

А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Спин-волновой нелинейный интерферометр

В работе описывается спин-волновой нелинейный интерферометр, изготовленный на основе монокристаллической пленки железо-иттриевого граната. Ключевым эффектом, лежащим в основе принципа действия прибора, является нелинейный фазовый сдвиг интенсивных спиновых волн. Приведена теоретическая модель прибора. Продемонстрировано амплитудно-селективное подавление импульсных СВЧ сигналов.

Ключевые слова: спиновые волны, нелинейный интерферометр

Как известно, интерферометрами называются устройства, в основе принципа действия которых лежит явление интерференции волн. В СВЧ технике можно создать интерферометры с применением спиновых волн. Интерферометры по принципу действия можно разделить на линейные и нелинейные. Настоящая работа посвящена описанию нелинейных интерферометров.

Основные отличия нелинейного интерферометра от линейного заключаются в следующем. В плечах линейного интерферометра содержатся линейные элементы, характеристики которых не зависят от мощности проходящего через них сигнала. Они изменяют фазу сигнала приложении к ним внешнего управляющего воздействия, например, электрического напряжения. В плечах нелинейного СВЧ-интерферометра содержатся нелинейные спин-волновые фазовращатели, фаза сигнала на выходе которых зависит от мощности проходящего через них сигнала.

В общем случае нелинейный спин-волновой интерферометр имеет схему, качественно показанную на рис. 1, а. Он имеет вид двухплечевой мостовой схемы и состоит из делителя СВЧ-мощности (в общем случае с произвольным коэффициентом деления), четырех переменных аттенюаторов A11, A12, A21 и A22, двух нелинейных фазовращателей НФВ1 и НФВ2 и сумматора СВЧ-мощности (с коэффициентом деления 0.5). Сверхвысокочастотный сигнал мощности P_{in} на входе интерферометра делится на два сигнала в определенной пропорции. Эти сигналы проходят разные плечи нелинейного интерферометра, приобретают разные фазовые набеги, а затем на выходе складываются и интерферируют. Приобретаемые в каждом из нелинейных фазовращателей фазовые набеги изменяются при увеличении мощности входного сигнала, а следовательно, изменяется и разность фаз интерферирующих сигналов, которая определяет уровень выходного сигнала нелинейного интерферометра.

При увеличении амплитуды прямых объемных и обратных объемных спиновых волн их фазовый набег уменьшается, а при увеличении амплитуды поверхностных спиновых волн – увеличивается. В связи с этим для увеличения чувствительности нелинейного интерферометра к величине входного сигнала целесообразно в разных плечах интерферометра использовать нелинейные фазовращатели, у которых зависимости изменения фазового набега от амплитуды имеют разные знаки. Такая

ситуация реализуется в двух случаях: (1) если в одном плече использовать фазовращатель на прямых объемных СВ, а в другом – фазовращатель на поверхностных СВ; (2) если в одном плече использовать фазовращатель на обратных объемных СВ, а в другом – фазовращатель на поверхностных СВ.

Переменные аттенюаторы служат для изменения амплитуд сигналов, складывающихся на выходе нелинейного интерферометра. Так, например, в дальнейшем будет показано, что практически интересным является случай, когда складывающиеся сигналы имеют одинаковые амплитуды. Тогда при синфазном сложении сигналов их амплитуда будет максимальной, а при противофазном сложении они будут подавляться до нуля. Данную ситуацию можно реализовать путем правильного подбора величин ослабления в переменных аттенюаторах.

Если нелинейный спин-волновой фазовращатель использовать только в одном плече интерферометра, а в другом один переменный аттенюатор, то получим интерферометр упрощенного вида, схема которого показана на рис. 1, б.

Приведем формулы для расчета рабочих характеристик нелинейного интерферометра. Комплексный коэффициент передачи нелинейного интерферометра имеет вид

$$\dot{H}(\omega, P_{in}) = \sqrt{H_p(\omega, P_{in})} \cdot \exp[i\varphi(\omega, P_{in})], \quad (1)$$

где $H_p(\omega, P_{in})$ – передаточная функция устройства по мощности, а $\varphi(\omega, P_{in})$ – фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами. Выражение для $H_p(\omega, P_{in})$ имеет вид

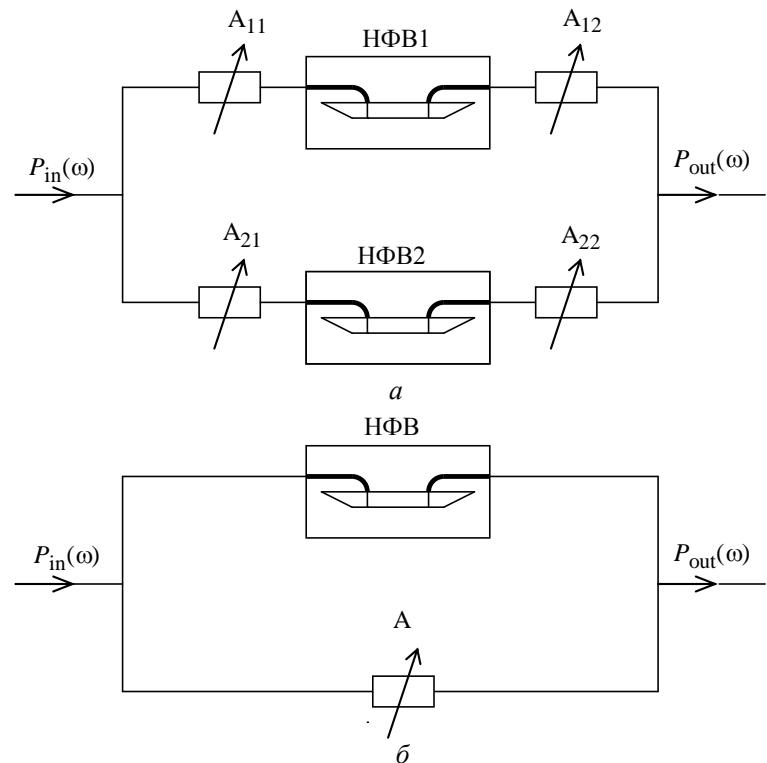


Рис. 1.

$$H_p(\omega, P_{in}) = \frac{1}{4} [H_1(\omega, P_{in1}) 10^{(A_{11}+A_{12})/10} + H_2(\omega, P_{in2}) 10^{(A_{21}+A_{22})/10} + \\ + 2\sqrt{H_1(\omega, P_{in1})H_2(\omega, P_{in2})} \cdot 10^{(A_{11}+A_{12}+A_{21}+A_{22})/20}] \cos[\Delta\varphi(\omega, P_{in21})], \quad (2)$$

где

$$\Delta\varphi(\omega, P_{in21}) = \varphi_2(\omega, P_{in2}) - \varphi_1(\omega, P_{in1}), \quad (3)$$

$$P_{in1} = 0.5P_{in} \cdot 10^{A_{11}/10}, \quad (4)$$

$$P_{in2} = 0.5P_{in} \cdot 10^{A_{21}/10}, \quad (5)$$

$$H_1(\omega, P_{in1}) = H_{in1}(\omega) \cdot H_{FF1}(\omega, P_{in1}) \cdot H_{out1}(\omega), \quad (6)$$

$$H_2(\omega, P_{in2}) = H_{in2}(\omega) \cdot H_{FF2}(\omega, P_{in2}) \cdot H_{out2}(\omega). \quad (7)$$

Подчеркнем, что коэффициент передачи нелинейного интерферометра является функцией как частоты, так и мощности входного сигнала P_{in} . В выражениях (2)–(7) A_{11} , A_{12} , A_{21} и A_{22} – ослабления сигналов (выраженные в децибелах) в переменных аттенюаторах; H_1 и H_2 – коэффициенты передачи фазовращателей; P_{in} – входная мощность интерферометра; P_{in1} и P_{in2} – входные мощности сигналов на входе фазовращателей НФВ1 и НФВ2, соответственно; $\Delta\varphi$ – разность фаз сигналов, интерферирующих на выходе устройства; φ_1 и φ_2 – полные фазовые набеги СВЧ-сигналов, прошедших через первое и второе плечи интерферометра. Разность фаз $\Delta\varphi$ является функцией как P_{in1} , так и P_{in2} , что для краткости записи обозначено функция от P_{in21} .

Фазочастотную характеристику нелинейного интерферометра можно рассчитать по формуле

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_0, & 0 < \varphi \leq \pi/2 \\ \pi - \varphi_0, & \pi/2 < \varphi \leq \pi \\ \pi + \varphi_0, & \pi < \varphi \leq 3\pi/2 \\ 2\pi - \varphi_0, & 3\pi/2 < \varphi \leq 2\pi \end{cases}, \quad (8)$$

где

$$\varphi_0 = \operatorname{arctg} \left| \frac{\sin(\varphi_1) + \sqrt{\frac{P_{out2}}{P_{out1}}} \sin(\varphi_2)}{\cos(\varphi_1) + \sqrt{\frac{P_{out2}}{P_{out1}}} \cos(\varphi_2)} \right|. \quad (9)$$

В формуле (9) P_{out1} и P_{out2} – мощности сигналов, интерферирующих на выходе интерферометра.

В качестве примера рис. 2 демонстрирует результаты расчета АЧХ и ФЧХ нелинейного интерферометра. Расчет проведен при помощи формул (2) и (8). Из

построенных зависимостей видно, что фазочастотная характеристика интерферометра имеет вид, не свойственный линейным СВЧ-приборам. Так, ФЧХ интерферометра, в котором интерферируют сигналы одинаковых амплитуд (рис. 2, *б*), имеет скачки на 180° , а ФЧХ интерферометра, в котором реализуется интерференция сигналов разных амплитуд (рис. 2, *в*), имеет немонотонный вид. Отметим, что вид фазочастотной характеристики можно регулировать, изменения величины затухания аттенюатора.

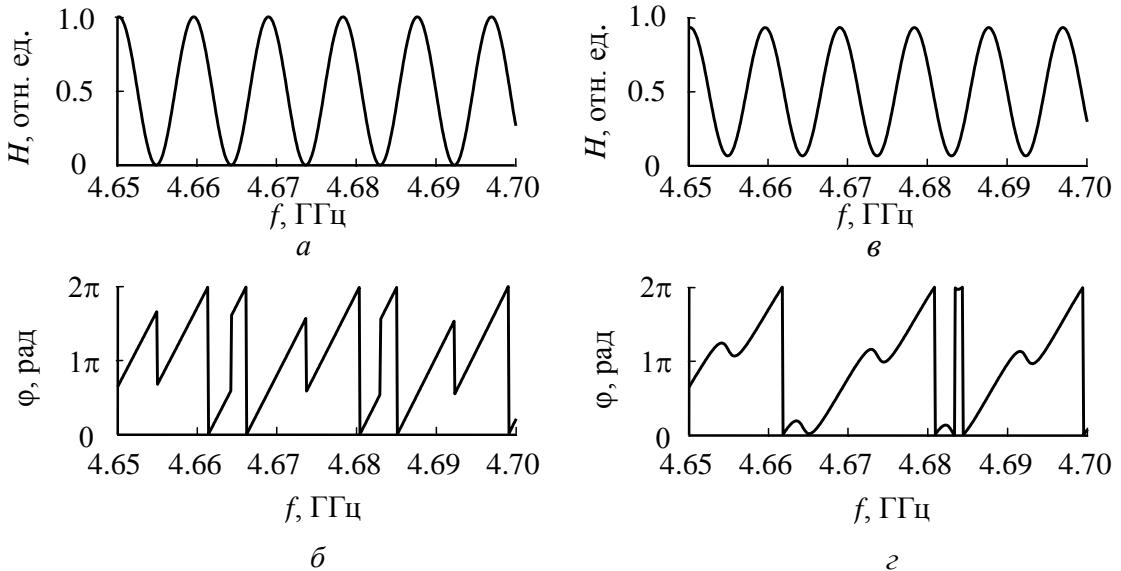


Рис. 2.

Выражения (2) и (7) были получены путем рассмотрения суммы двух колебаний с помощью метода комплексных амплитуд. Расчет амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик интерферометров по этим выражениям показывает, что амплитудно-частотная характеристика интерферометра имеет вид чередующихся максимумов и минимумов (см. рис. 2, *а* и *в*). Максимумы или минимумы наблюдаются на тех частотах, на которых сигналы, прошедшие разные плечи интерферометра, складываются соответственно синфазно или противофазно. Если складывающиеся сигналы имеют одинаковую мощность, то в точках минимума значения АЧХ равны нулю. Фазочастотная характеристика в точках минимума АЧХ претерпевает скачок на 180° .

Моделирование АЧХ и ФЧХ интерферометров по формулам (2) и (8) также показывает, что в отличие от линейного интерферометра, при увеличении уровня мощности СВЧ сигнала амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики нелинейного интерферометра смещаются по частоте.

С помощью нелинейного спин-волнового интерферометра возможна реализация амплитудно-селективного подавления радиоимпульсов СВЧ диапазона. Такая функция не свойственна традиционным СВЧ приборам. Остановимся на ней подробнее.

Типичная передаточная характеристика нелинейного спин-волнового интерферометра имеет вид, показанный на рис. 3, *а*. Если последовательность входных импульсов состоит из импульсов низкой мощности и импульсов высокой мощности (рис. 3, *б*), то импульсы высокой мощности должны эффективно подавляться, а импульсы низкой мощности должны проходить на выход устройства практически без искажения формы (рис. 3, *в*).

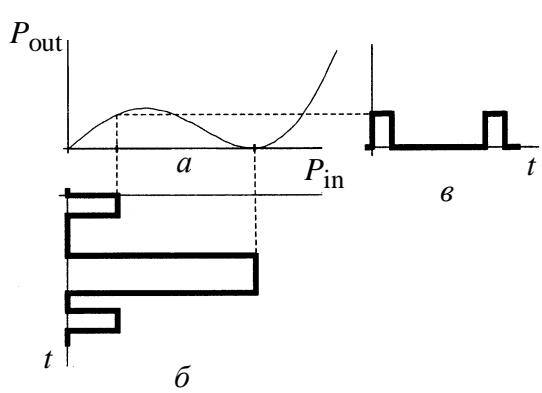


Рис. 3.

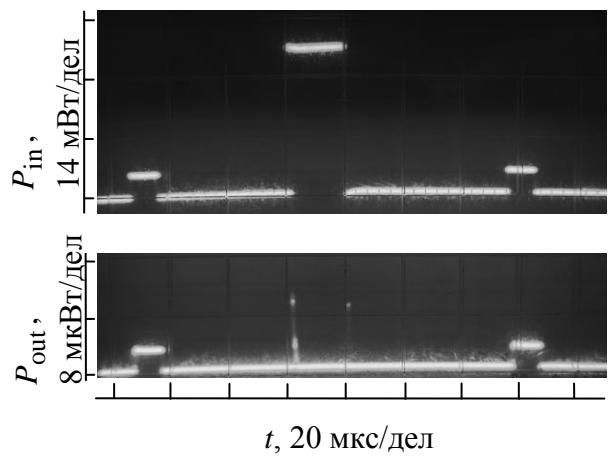


Рис. 4.

Экспериментально наблюдавшееся амплитудно-селективное подавление радиоимпульсов показано на рис. 4. Эксперимент был проведен следующим образом. Сверхвысокочастотный сигнал в форме периодической последовательности прямоугольных импульсов с двумя различными мощностями подавали на вход интерферометра. Несущая частота импульсов была равна 3485 МГц. Длительность импульсов меняли от 1 до 50 мкс, а период следования импульсов – от 5 до 500 мкс.

Как видно из рис. 4, импульсы высокой мощности подавлялись при увеличении их мощности до 34 мВт, в то время как импульсы низкой мощности проходили через нелинейный интерферометр практически без искажения формы. Таким образом, нелинейный интерферометр выполнял амплитудно-селективное подавление СВЧ-импульсов.

Работа поддержана грантом РФФИ.