

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

УДК 548:621.372

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ОПТИКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТНОЇ ДИСПЕРСІЇ НА ПОШИРЕННЯ МАГНІТОСТАТИЧНИХ ХВИЛЬ У ЛІНІЇ ЗАТРИМКИ

*Кудінов Є.В., к.т.н., ст. наук. співробітник
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

Для обробки радіосигналів надвисокої частоти (НВЧ), зокрема, стиснення радіоімпульсів з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) несучої частоти, раціонально використовувати дисперсійні лінії затримки на основі магнітостатичних хвиль (МСХ), що розповсюджуються в намагніченій до насичення епітаксильній феритовій плівці.

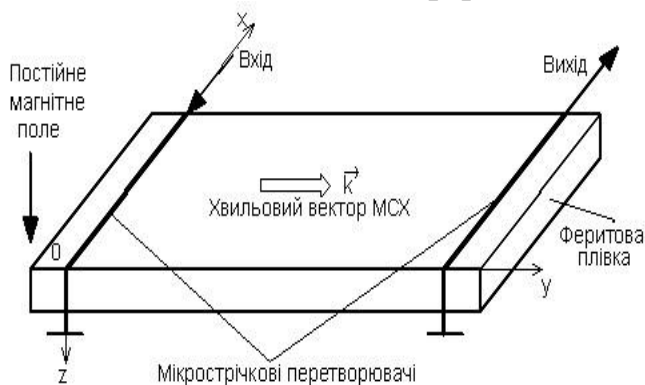


Рис. 1 Лінія затримки на основі магнітостатичних хвиль (МСХ)

Крім дуже малих габаритів і планарної конструкції, така лінія затримки має унікальну здатність керування її параметрами шляхом регулювання напруженості постійного магнітного поля, яке намагнічує феритову плівку.

Задача поширення магнітостатичних хвиль з урахуванням дисперсійних властивостей середовища, якою є феритова плівка як хвилеспрямовуюча структура, розглядалося, наприклад, в роботі [1], де проаналізовано, як змінюється широкосмуговий сигнал в структурі з дисперсією.

Але застосування для вирішення цієї задачі методу геометричної оптики [2] дає можливість отримати уявлення про особливості проходження широкосмугових радіоімпульсів з ЛЧМ в дисперсійній лінії затримки на основі МСХ, що є більш наочним.

Постановка задачі

Задача дослідження особливостей проходження широкосмугового сигналу таким чином, зводиться до вирішення рівняння ейконалу $\Psi(x, y, z, t)$, яке визначає поверхню постійної фази хвилі, тобто положення цієї поверхні в просторі та часі. Результати аналізу дають можливість визначити параметри дисперсійної лінії затримки з метою їх узгодження з характерис-

тиками радіосигналу, такого як радіоімпульс з ЛЧМ, для отримання бажаного результату обробки радіосигналу, скажімо, максимального стиснення.

Аналіз рівняння ейконалу

Для нескінченній в площині xu плівки фериту, в якій МСХ з плоским фазовим фронтом поширюються вздовж осі y , рівняння ейконалу має дуже простий вигляд

$$\frac{d\Psi}{dt} + v_p(\omega) \frac{d\Psi}{dy} = 0$$

де $v_p(\omega) = \omega/k_y$ – фазова швидкість МСХ, що є функцією частоти ω , $k_y(\omega)$ – повздовжнє хвильове число.

Відповідно рішення для біжучої хвилі має бути представлено як

$$\Psi = \omega t - k_y(\omega) y$$

Це рішення може бути представлено на площині yt , побудовою на ній так званих характеристик, тобто ліній, які показують положення в просторі та часі фронту хвилі.

Розглянемо поширення МСХ, яка відповідає радіоімпульсу з ЛЧМ тривалістю 2τ , де миттєве значення частоти в імпульсі $\omega = \omega_0(1 + \delta t)$, ω_0 – несуча частота.

$$\delta = (1/|\tau|)(\Delta\omega/\omega_0)$$

де $\Delta\omega$ – девіація частоти за час τ .

Координата $y = 0$ відповідає початку області поширення МСХ, і час $t = 0$ відповідає значенню частоти $\omega = \omega_0$, тоді фаза, яка (залежно від знака τ) відповідає передньому ($-\tau$) і задньому ($+\tau$) фронтам імпульсу

$$\Psi_{\mp} = \omega\tau(1 + \delta\tau)$$

Враховуючи вищенаведені вирази, рівняння для характеристик, що відповідають Ψ_{\mp}

$$y_{\mp} = \frac{\omega_0(1 + \delta\tau)}{k_y(\omega)}(t - \tau) \tag{1}$$

Представимо $k_y(\omega)$ у вигляді ряду Тейлора і будемо вважати, що в смузі частот спектра імпульсу, залежність поздовжнього хвильового числа від частоти лінійна, тобто достатньо двох членів ряду Тейлора:

$$k_y(\omega) = k_{y0}(\omega_0) + \frac{dk_y}{d\omega}(\omega - \omega_0),$$

Будемо вважати, що в межах смуги частот спектра імпульсу фазова швидкість не сильно залежить від частоти:

$$\left| k_{y0} \left(\frac{dv_p}{d\omega} \right) \right| \ll 1 \tag{2}$$

що при заміні диференціалів скінченними приростами еквівалентно умові

$$|\Delta v_p| / v_{p0} \ll |\Delta \omega| / \omega_0$$

де $v_{p0} = v_p(\omega_0)$. Тоді, враховуючи, що $k_{y0} = \omega_0 / v_{p0}$, і, відповідно,

$$\frac{dk_y}{d\omega} = \frac{1}{v_{p0}} \left(1 - k_{y0} \frac{dv_p}{d\omega} \right) \approx \frac{1}{v_{p0}},$$

y_{\mp} можна представити:

$$y_{\mp} = \frac{\omega_0(1 + \delta\tau)(t - \tau)}{k_{y0} + \frac{\omega_0}{v_{p0}} \delta\tau} = v_{p0}(t - \tau)$$

У цьому випадку характеристики (залежно від знака τ) - паралельні лінії, тобто імпульсний сигнал передається без зміни тривалості імпульсів.

Якщо умова (2) не виконується, можна показати, що для дисперсійної лінії затримки, за умови, що параметри ЛЧМ і параметри дисперсії узгоджуються так, що радіоімпульс стискається, є точка, де характеристики перетинаються, і цю точку будемо називати просторово-часовим фокусом.

Із умови $y_- = y_+$ знаходимо положення фокуса у часі

$$t = - \frac{k_{y0} - \frac{dk_y}{d\omega} \omega_0 (\delta\tau)^2}{k_{y0} - \frac{dk_y}{d\omega} \omega_0 \delta}$$

і у просторі

$$y = -\omega_0 \frac{1 - (\delta\tau)^2}{k_{y0} - \frac{dk_y}{d\omega} \omega_0 \delta}$$

Приклад характеристик

Для прикладу розглянемо, як дисперсія прямих об'ємних магнітостатичних хвиль (ПОМСХ) (постійне магнітне поле прикладене по нормалі до поверхні епітаксильної феритової плівки) впливає на проходження радіоімпульсу з ЛЧМ і з усього спектру ПОМСХ виберемо моду нижчого порядку, дисперсійне співвідношення для якої згідно [3] виглядає наступним чином:

$$k_{ys} = \frac{2}{\sqrt{-\mu}} \arctan \frac{1}{\sqrt{-\mu}} \quad (3)$$

де s - товщина епітаксильної плівки, μ - діагональна компонента тензора магнітної проникності:

$$\mu = 1 + \frac{\omega_H \omega_M}{\omega_H^2 - \omega^2}$$

Тут, $\omega_M = \gamma 4\pi M_0$, $\omega_H = \gamma(H - 4\pi M_0)$ γ - гіромагнітне відношення,

$4\pi M_0$ – намагніченість насичення, H – напруженість зовнішнього магнітного поля.

Очевидно, що при початкових умовах: $y = 0$, $t = \mp \tau$

$$\Psi_{\mp} = \mp(\omega_0 \pm \Delta\omega)\tau$$

Оскільки дисперсійне співвідношення (3) може бути легко обчислене в явному вигляді, то немає потреби представляти його рядом Тейлора і можна скористатися ним в виразі (1) для характеристик.

Характеристики $t = F(y)$ більш наглядно можна представити в нормалізованих координатах $\omega t = F(y/s)$. Відповідно

$$\omega t_{1,2} = \omega_0(1 \pm \delta\tau)(\mp \tau) + \frac{2}{\sqrt{-\mu_{1,2}}} \arctan \frac{1}{\sqrt{-\mu_{1,2}}} \frac{y}{s}$$

де $\mu_1 = \mu(\omega_0 + \Delta\omega)$, $\mu_2 = \mu(\omega_0 - \Delta\omega)$

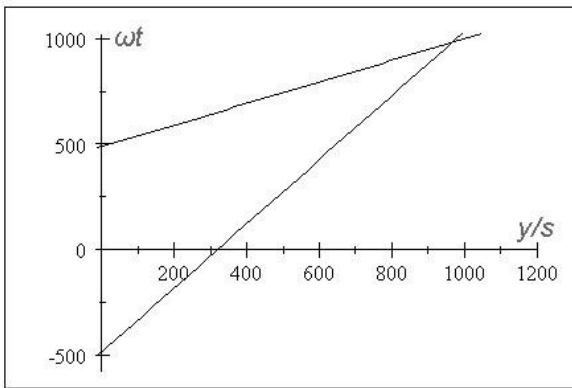


Рис. 2. Характеристики для дисперсійної лінії затримки. $f_0 = 1,5 \cdot 10^9$; $\Delta f = 0,05 \cdot 10^9$; $4\pi M_0 = 1,75 \cdot 10^3$ Гс; $H = 2,0 \cdot 10^3$ е

На рис. 2 представлені результати розрахунку характеристик для переднього і заднього фронтів радіоімпульсу з ЛЧМ, при його проходженні в дисперсійній лінії затримки на основі ПОМСХ. Видно, що у наближенні геометричної оптики, тривалість імпульсу у фокусі дорівнює нулю, а потім імпульс починає розширюватися.

Висновки

Показано, що для одновимірної задачі лінії постійної фази, так звані характеристики, побудовані на координатній площині поздовжня координата – час для дисперсійної лінії затримки на основі МСХ, за умови, що параметри ЛЧМ і параметри дисперсії узгоджені так, що радіоімпульс стискається, є точка, де характеристики перетинаються і яку назовемо просторово-часовим фокусом. У цій точці імпульс стає нескінченно вузьким, а при значеннях координати і часу більше тих, що є у фокусі, імпульс починає розширюватися.

Але зрозуміло, що тільки в наближенні геометричної оптики радіоімпульс у фокусі нескінченно вузький, а яким він буде насправді можна розрахувати, користуючись результатами [1].

Істотний висновок, до якого приводить аналіз з використанням методу геометричної оптики поширення в хвилеспрямуючій структурі радіоім-

пульсу з ЛЧМ, перетвореного в магнітостатичні хвилі, полягає в тому, що існує просторово-часової фокус, в якому стиснення радіоімпульсу найбільше. Тобто існує оптимальне співвідношення між параметрами ЛЧМ, частотної дисперсії в лінії затримки, її протяжністю l , відповідно, часом затримки, при якому стиснення радіоімпульсу найбільше. У деяких межах підтримання цього оптимального співвідношення можливо шляхом регулювання напруженості постійного магнітного поля.

Література

1. Кудинов Е.В., Берегов А.С. Использование принципа декомпозиции при построении математических моделей спин-волновых устройств. - Изв. вузов. Физика, 1988, № 11, с. 106-124.
2. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М., изд. "Наука". Гл. ред. физ.-мат. лит., с. 432, 1990
3. Данилов В.В., Зависляк И.В., Балинский М.Г. Спинволновая электродинамика. К., изд. "Либідь", 1991. С. 212.

Кудинов Є.В. Застосування методу геометричної оптики для визначення впливу частотної дисперсії на поширення магнітостатичних хвиль у лінії затримки. Застосовуючи метод геометричної оптики, показано, що для дисперсійної лінії затримки, за умови, що параметри імпульсу з ЛЧМ і параметри дисперсії МСХ узгоджені так, що радіоімпульс стискається, є точка, де характеристики перетинаються, і цю точку називатимемо просторово-часовим фокусом. Тобто існує оптимальне співвідношення між параметрами ЛЧМ, частотної дисперсії в лінії затримки, її протяжністю l , відповідно, часом затримки, при якому стиснення радіоімпульсу найбільше. У деяких межах підтримання цього оптимального співвідношення можливо шляхом регулювання напруженості постійного магнітного поля.

Ключові слова: Магнітостатичні хвилі, дисперсія, лінії затримки, стиснення радіоімпульсу

Кудинов Е.В. Применение метода геометрической оптики для определения влияния частотной дисперсии на распространение магнитостатических волн в линии задержки. Применяя метод геометрической оптики, показано, что для дисперсионной линии задержки, при условии, что параметры импульса с ЛЧМ и параметры дисперсии МСВ согласованы так, что радиоимпульс сжимается, есть точка, где характеристики пересекаются, и эту точку будем называть пространственно-временным фокусом. То есть существует оптимальное соотношение между параметрами ЛЧМ, частотной дисперсии в линии задержки, ее протяженностью l , соответственно, временем задержки, при которых сжатие радиоимпульса наибольшее. В некоторых пределах поддержания этого оптимального соотношения возможно путем регулирования напряженности постоянного магнитного поля.

Ключевые слова: магнитостатических волны, дисперсия, линии задержки, сжатие радиоимпульса

E.Kudinov Application of the method of geometrical optics to determine the effect of frequency dispersion on the propagation of magnetostatic waves in the delay line. Applying the method of geometrical optics, it is shown that for a dispersive delay line, provided that the parameters of pulse linear FM and dispersion parameters of MSW coordinated so that the RF

pulse is compressed, there is a point where the characteristics intersect, and this point is called a spatial-temporal focus. That is, there exists an optimal ratio between the parameters of linear FM, the frequency dispersion in the delay line, its length and, consequently, the delay time at which the RF pulse compression maximum. In certain limits to maintain this optimum ratio is possible by regulating the intensity of a constant magnetic field.

Keywords: *magnetostatic wave dispersion, delay line, rf pulse compression*