

УДК 621. 372(075.8)

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

**Т.В. Гаврилова, доцент, к.ф.-м.н., ХНАДУ, Ю.Б. Сидоренко, ст. н. с., к.ф.-м.н.,
ИРЭ НАН Украины, К.С. Козликина, студент, ХНАДУ**

***Аннотация.** Путем численного анализа спектральных функций и интегральных представлений рассеянного поля проведено исследование задачи рассеяния электромагнитных импульсов (ЭМИ) произвольной длительности плоским периодическим препятствием в виде ленточной дифракционной решетки. Прослежено изменение структуры и параметров ЭМИ при прохождении периодического препятствия.*

***Ключевые слова:** спектральные функции, электромагнитный импульс, рассеивание, периодическое препятствие, дифракционная решетка, амплитуда, групповая задержка, эффективная длительность.*

РОЗСІЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ІМПУЛЬСІВ ДОВІЛЬНОЇ ТРИВАЛОСТІ ПЕРІОДИЧНИМИ ПЕРЕШКОДАМИ

**Т.В. Гаврилова, доцент, к.ф.-м.н., ХНАДУ, Ю.Б. Сидоренко, ст. н. с., к.ф.-м.н.,
ІРЕ НАН України, К.С. Козлікіна, студент, ХНАДУ**

***Анотація.** Шляхом чисельного аналізу спектральних функцій та інтегральних уявлень розсіяного поля проведено дослідження задачі розсіювання електромагнітних імпульсів (ЕМІ) довільної тривалості плоскою періодичною перешкодою у вигляді стрічкової дифракційної решітки. Простежено зміну структури і параметрів ЕМІ при проходженні періодичної перешкоди.*

***Ключові слова:** спектральні функції, електромагнітний імпульс, розсіювання, періодична перешкода, дифракційна решітка, амплітуда, групова затримка, ефективна тривалість.*

SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC PULSES OF ARBITRARY DURATION FOR OBSTACLE

**T. Gavrilova, associate professor, cand. ph.-m. sc., KhNAHU, Yu. Sidorenko, art. n. s.,
cand. ph.-m. sc., IRE NASU, K. Kozlikina, student, KhNAHU**

***Abstract.** The problem of scattering of electromagnetic pulse (EMP) an arbitrary length of flat periodic obstacle in the form of a band of the gratin by numerical analysis of spectral functions and integral representations of the scattered field is investigated. The changing of the structure and parameters of the scattered field of EMR on a periodic obstacles were trace.*

***Keywords:** spectral functions, electromagnetic pulse, scattering, periodic obstacle, diffraction grating, amplitude, group delay, the effective duration.*

Введение

Исследования электромагнитных импульсов (ЭМИ) малой длительности или, как принято

их сегодня называть, сверхширокополосных (СШП) сигналов, обусловлены их способностью переносить больший объем информации, чем традиционные узкополосные сигнала

лы. Это обстоятельство служит стимулом в развитии новых подходов к построению средств радиолокации нового поколения, дистанционного радиозондирования, геолого-разведки и т.д. [1].

Известно, что прошедший или отраженный от препятствия сигнал несет в себе информацию об его электродинамических свойствах, форме, местоположении и т.д. Знание особенностей структуры таких сигналов позволяет в результате их обработки решать задачи идентификации рассеивающих объектов. Соответствующие сравнительные базы данных могут быть получены на основе решения задач рассеяния сигналов препятствиями, являющимися базовыми моделями реально существующих рассеивающих объектов. Одними из них могут быть периодические препятствия, в частности, дифракционные решетки.

Постановка задачи

Исследование задачи дифракции амплитудно-модулированного (АМ) импульса с гауссовой огибающей на плоской ленточной решетке, состоящей из бесконечно тонких и идеально проводящих лент, расположенных с периодом l , было проведено в строгой математической постановке в работе [2]. Использование метода комплексных амплитуд позволило свести рассматриваемую задачу к ключевой задаче о рассеянии плоской монохроматической волны периодическими препятствиями, математически строго обоснованное решение которой можно получить при помощи развитого аппарата теории дифракции плоских волн [3].

Показано, что рассеянное периодической решеткой поле представляет собой бесконечный набор пространственных гармоник, амплитудные и фазовые характеристики которых определяются видом спектральной функции первичного сигнала и частотной зависимостью передаточных функций решетки $c(\omega)$.

Аналитические выражения, описывающие свойства ЭМИ, рассеянного дифракционной решеткой, можно получить только при некоторых ограничениях, налагаемых на параметры первичного сигнала и периодического препятствия. Выяснить особенности пространственно-временной динамики взаимо-

действия ЭМИ с препятствием, поведение его спектральных характеристик в широком диапазоне длительностей сигнала представляется возможным путем численного расчета интегральных представлений для дифракционного поля следующего вида

$$U^{(j)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{s=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) c_s^{(j)}(\omega) e^{\pm i\gamma_s z + i \frac{2\pi s}{l} y - i\omega t} d\omega.$$

Здесь $j=1$ и верхний знак в показателе экспоненты соответствует области I (над решеткой), а $j=2$ и нижний знак – области II (под решеткой). Под $U^{(j)} = U^{(j)}(y, z, t)$ мы будем понимать $E_x^{(j)}$ или $H_x^{(j)}$ компоненты электрического или магнитного поля рассматриваемого ЭМИ, а $c_s^{(j)}(\omega)$ – комплексные передаточные функции соответственно для области I ($j=1$) и области II ($j=2$), определяемые из решения краевой задачи дифракции на решетке плоской монохроматической волны с фиксированной частотой ω соответствующей поляризации (ось ox направлена вдоль образующих лент решетки);

$F(\omega) = T_0 e^{j\omega t_0} \exp\left[-T_0^2(\omega - \omega_0)^2 / 2\right]$ – спектральная функция первичного поля;
 $\gamma_s(\omega) = \sqrt{(\omega/c)^2 - (2\pi s/l)^2}$ – продольное волновое число, c – скорость света.

Анализ спектральных функций рассеянных полей

Очевидно, что форма и фазовое заполнение рассеянных полей определяются соответствующими им спектральными функциями, которые в свою очередь зависят от ширины спектра первичного сигнала и вида комплексных коэффициентов $c_s^{(j)}(\omega)$. Численный анализ зависимостей от частоты амплитудных спектров основного импульса ($S=0$) был проведен для квазимонохроматических сигналов ($\omega_0 T_0 = 20\pi$) и СШП сигналов ($\omega_0 T_0 = 0,1\pi$ и $\omega_0 T_0 = 0,04\pi$).

Выяснено, что для квазимонохроматического сигнала форма спектральной функции основного импульса практически совпадает с формой спектра первичного сигнала, а ам-

плитуда пропорциональна значению модуля коэффициента прохождения, задаваемого несущей частотой ω_0 . Для случая дифракции СШП импульса характер зависимости амплитудных спектров от частоты значительно отличается даже для основного импульса. Наиболее сильные искажения его формы соответствуют случаю, когда несущая частота сигнала близка к значению так называемой точки скольжения ($\alpha_0 = \omega_0 l / 2\pi c \approx 0,99$). В этом случае в форме огибающей СШП сигнала появляются изломы, характерные для поведения коэффициента прохождения плоской монохроматической волны сквозь ленточную решетку. Если же ширина спектра первичного сигнала охватывает область достаточно медленного изменения функции $c_0(\alpha)$, то форма ее спектральной функции значительно не изменяется.

Таким образом, численный анализ амплитудных спектров дифракционных импульсов, прошедших через ленточную решетку, показывает, что форма спектра сохраняется только для узкополосных сигналов. Отсюда следует, что при аналитическом исследовании таких сигналов правомерно ограничиться приближением $|c(\alpha)| \approx |c(\alpha_0)|$. Выявление изменений в спектрах рассеянных СШП импульсов требует применения численных методов для решения данной задачи.

Характеристики рассеянных полей

Анализ физических свойств рассеянных ленточной решеткой полей, представляющих собой бесконечный набор пространственных гармоник, амплитудные и фазовые характеристики которых определяются видом спектральной функции первичного сигнала и частотной зависимостью передаточных функций решетки, осуществлялся для двух случаев.

Одним из них является важный с практической точки зрения случай узкополосного сигнала, для которого справедливо условие $\omega_0 T_0 \ll 1$ (ω_0 - несущая частота первичного сигнала, T_0 - эффективная длительность). Для таких импульсов наблюдается сохранение формы первичного сигнала, что объясняется самой структурой гауссова сигнала: он бесконечен во времени, лишен резкого фронта и предвестников.

СШП сигналы ($\omega_0 T_0 \leq 1$) после прохождения ленточной решетки претерпевают по сравнению с узкополосными сигналами ряд изменений. К ним относятся: уменьшение пиковой амплитуды сигнала (особенно при значениях параметра заполнения решетки $d/l > 0,3$, где d - ширина щели решетки); появление групповой задержки, изменение эффективной длительности сигнала, обусловленной, в основном, увеличением заднего фронта ($t > t_0 + |z|/c$).

Проведенные расчеты позволили определить параметры периодической решетки, при которой происходит практически полное прохождение основного импульса. Так, при $\alpha_0 = \omega_0 l / (2\pi c) = 0,4$ этому случаю соответствует решетка с очень узкими лентами ($d/l \approx 0,99$). При $\alpha_0 = 0,99$ (несущая частота близка к частоте экстремальной точки, так называемой точки скольжения), диапазон параметра d/l расширяется, и полное прохождение уже наблюдается при $d/l = 0,8$.

Выяснено, что сдвиг несущей частоты и сужение спектра сигнала приводят к увеличению относительной эффективной длительности и появлению групповой задержки в рассеянном поле. Полученные численными расчетами зависимости относительной эффективной длительности (рис.1) и относительной групповой задержки (рис.2) от коэффициента заполнения решетки дают возможность определить параметры периодической решетки, при которых рассеянный сигнал обладает наибольшими искажениями. Очевидно, что эти искажения будут тем больше, чем больше ширина спектра первичного сигнала и чем ярче выражены дисперсионные свойства структуры.

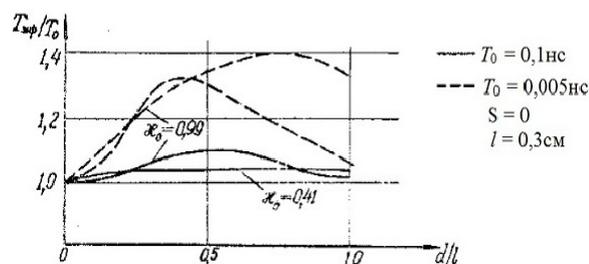


Рис. 1. Зависимость эффективной длительности рассеянного импульса от параметра заполнения решетки

Расчеты амплитудных спектров первой дифракционной гармоники, полученные в случае, когда несущая частота сигнала совпадает с частотой точки скольжения ($\alpha_0 \approx 0,99$), для различных расстояний от решетки, показывают, что искажение спектра сигнала увеличивается с ростом расстояния z , перпендикулярном плоскости решетки. Вследствие резкого уменьшения ширины спектра дифракционная гармоника с такими параметрами будет быстро расплываться при распространении от решетки.

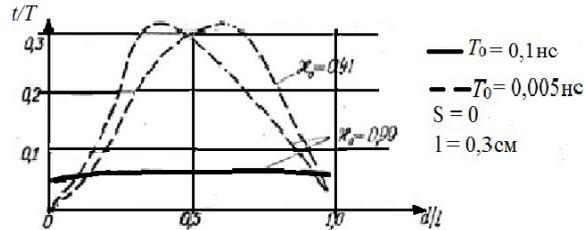


Рис.2. Зависимость групповой задержки рассеянного импульса от параметра заполнения решетки

Для широкополосного случая уже на расстояниях $\sim 50\lambda_0$ от решетки первая импульсная гармоника рассеянного поля практически полностью теряет форму, превращаясь, по сути, в плоскую волну.

Для малой ширины спектра, не включающей точек скольжения, искажений формы высших гармоник сигнала не происходит

При численных расчетах интегральных представлений Фурье бесконечные пределы интегрирования были заменены конечными, что приводит к ошибке не превышающей $1/|\theta|$, где $\theta = 2\pi(|z| - c(t - t_0)) / l \rightarrow \infty$.

Выводы

Таким образом, рассмотрение задачи дифракции СШП импульсов ленточной дифракционной решеткой в строгой постановке позволяет с помощью численных методов получить как структуру рассеянных полей, так и зависимости основных их характеристик от параметров периодического препятствия.

Литература

1. Гаврилова Т.В. Особенности рассеяния модулированных сигналов периодическими препятствиями / Изв. ВУЗов. Радиофизика, т.23, №9, 1980. – с.1067-1074.
2. Шестопалов В.П. Метод задачи Римана-Гильберта в теории дифракции / Харьков. Госуниверситет. – Харьков, 1971. - 400с.
3. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы / Радиофизика и электроника, т. 13, №2, 2008 – С. 166-194.