

## ОСОБЕННОСТИ ЭФФЕКТА ДОПЛера В МНОГОМОДОВОМ ВОЛНОВОДЕ

А.Г. Глущенко<sup>1</sup>, Е.П. Глущенко<sup>1</sup>, Е.С. Устинова<sup>2</sup><sup>1</sup>Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия,<sup>2</sup>Поволжский государственный университет сервиса, Самара, Россия

## Аннотация

В работе рассмотрена особенность эффекта Доплера при отражении волн от подвижного слоя диэлектрика в многомодовых волноводах для основной и высших типов волн. Получены расчётные соотношения для нахождения частот различных мод отражённых и прошедших через слой подвижного диэлектрика волн. Установлено, что с увеличением индекса мод зависимость частоты отражённых волн от скорости движения слоя диэлектрика уменьшается, а для прошедших волн, наоборот, возрастает. Взаимодействие волны с неоднородным подвижным слоем приводит к возбуждению высших мод отражённых и прошедших волн таким образом, что каждой моде соответствуют различные частотные сдвиги (мультичастотный эффект Доплера).

**Ключевые слова:** многомодовые волноводы, отражение, мультичастотный эффект Доплера.

**Цитирование:** Глущенко, А.Г. Особенности эффекта Доплера в многомодовом волноводе / А.Г. Глущенко, Е.П. Глущенко, Е.С. Устинова // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 5. – С. 687-693. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-687-693.

## Введение

При отражении волн от движущихся объектов наблюдается изменение частоты отражённых волн (эффект Доплера) [1–9]. Величина этого изменения зависит от соотношения скорости движения объектов и скорости волн в среде [10–14]. Эффект Доплера впервые был обоснован теоретически и подтверждён экспериментально в акустике и оптике. Широкое использование этого физического эффекта в различных областях техники определяет постоянное внимание к нему. В последнее время наблюдается повышенный интерес к эффекту Доплера [3, 14–19] в связи с открытием новых возможностей его использования в различных областях оптики [20–23], микроволновой техники [24, 25], релятивистской техники [26–30], технической акустики различных разновидностей эффекта: аномального, обратного, поперечного, двойного, параметрического [28, 30], сложного, вращательного, релятивистского, сверхсветового [29] и др. Особое внимание уделяется условиям возникновения аномального [10, 11], нелинейного [14, 15], вращательного [14, 17–19] эффектов Доплера, наблюдаемых при взаимодействии излучений с анизотропными, гиротропными и киральными средами и метасредами [20, 21]. Доплеровское смещение спектральных линий было обнаружено в спектрах звёзд и туманностей. В астрофизике эффект Доплера используется для определения скорости движения звёзд, а также скорости вращения небесных тел [2, 4]. Измерения доплеровского красного смещения линий в спектрах излучения галактик привели к выводу о расширении Вселенной. Доплеровское уширение спектральных линий излучения атомов и ионов даёт способ измерения их температуры. В радио- и гидролокации эффект Доплера используется для измерения скорости движущихся объектов. В медицине эффект Доплера используется для диагностики кровеносных сосудов, сердца и т. п. [15, 23].

Эффект Доплера может быть хорошо и наглядно описан геометрическими моделями, что привлекает авторов многих исследований, однако возможности анализа эффекта в этом случае ограничены наиболее простыми конфигурациями [2–5]. Следует отметить, что эффект Доплера рассматривается обычно в пространственно одномерном приближении без учёта поперечного распределения поля [1–5, 8]. Вместе с тем поперечное распределение поля в пространственно ограниченных структурах существенно влияет на особенности волновых процессов [22–25], в том числе на отражение волн от неоднородностей структуры. Влияние различных факторов: движения границ разделов сред, движения самих сред, – сопровождающееся увлечением ими волновых процессов, определяет целесообразность более строгого анализа эффекта отражения от подвижных границ разделов областей на основе теории волновых процессов любой физической природы (электродинамики, акустики и др.) [6, 8]. В настоящей работе рассмотрены особенности отражения волн от подвижного слоя в многомодовой волноводной структуре. Показано, что изменение частоты в эффекте Доплера зависит от скорости движения подвижного слоя и индекса моды распространяющихся волн. В многомодовых волноводных структурах с подвижными неоднородными средами может наблюдаться многочастотный эффект Доплера.

## 1. Моделирование

Рассмотрим эффект Доплера при отражении основной и высших мод многомодового плоского волновода от слоя магнитодиэлектрика, движущегося вдоль оси волновода. Основные особенности эффекта могут быть рассмотрены на модели плоского волновода (рис. 1). Пусть однородный слой среды 2 толщиной  $d$  с показателем преломления  $n_2 = \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}$  движется с постоянной скоростью  $u$  вдоль оси волновода  $Ox$ . Координата левого края слоя описывается во времени зависимостью  $x = ut$ , правого:  $x = ut + d$ . Слева

от границы расположена среда 1, характеризующаяся показателем преломления  $n_1 = \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}$ . Справа – среда 3 с показателем преломления  $n_3 = \sqrt{\epsilon_3 \mu_3}$ . Скорость распространения волн в первой среде равна  $c_1 = c/n_1$ , в третьей:  $c_3 = c/n_3$ ,  $c$  – скорость света в вакууме. Во второй среде с учётом движения среды вдоль оси волновода  $Ox$  скорости волн в прямом и обратном направлениях в общем случае различаются  $c_{21} \neq c_{22}$  [6]. Для анализа особенностей отражения электромагнитных волн, падающих из области 1 на поверхность подвижного слоя 2, и прохождения волн в область 3 рассмотрим  $H(H_x, E_y, H_z)$  волны.

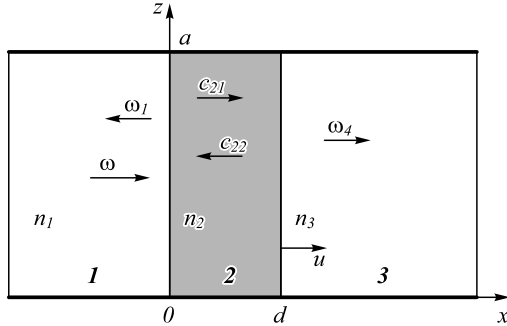


Рис. 1. Отражение и прохождение волн через подвижный слой среды в волноводе

Волновые уравнения в областях 1–3 имеют вид:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \epsilon_i \mu_i k_0^2 \right) E_y = 0. \tag{1}$$

Граничные условия на стенках волновода:

$$E_y(z=0, a) = 0 \tag{2}$$

и на подвижных границах раздела сред ( $x = ut$ ) имеют вид [6, 24, 25]:

$$\begin{aligned} E_{1y}(x) &= E_{2y}(x), & H_{1z}(x) &= H_{2z}(x), \\ E_{2y}(x+d) &= E_{3y}(x+d), \\ H_{2z}(x+d) &= H_{3z}(x+d). \end{aligned} \tag{3}$$

Анализ показывает, что решение существует, когда частоты падающих и отражённых волн в каждом из слоёв в общем случае различны. Решение в каждой из областей ищется в виде:

$$\begin{cases} E_{11y} = A_{11} \sin k_z z \cdot \exp[i(\omega t - k_{11}x)] \\ E_{12y} = A_{12} \sin k_z z \cdot \exp[i(\omega_1 t + k_{12}x)] \end{cases} \quad x \leq 0, \\ \begin{cases} E_{21y} = A_{21} \sin k_z z \cdot \exp[i(\omega_2 t - k_{21}x)] \\ E_{22y} = A_{22} \sin k_z z \cdot \exp[i(\omega_3 t + k_{22}x)] \end{cases} \quad 0 \leq x \leq d, \tag{4} \\ E_{31y} = A_{31} \sin k_z z \cdot \exp[i(\omega_4 t - k_{31}x)] \quad x \geq d,$$

где в общем случае волновые числа прямых и обратных волн могут различаться  $k_{11} \neq k_{12}$ ,  $k_{21} \neq k_{22}$ .

Проекция волнового числа на ось  $Oz$  с учётом граничных условий в плоскостях  $y=0$ ,  $y=a$  равна  $k_{zm} = m\pi/a$ ,  $m = 1, 2, 3, \dots$  – индекс моды. Продольные

волновые числа для плоского волновода определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} k_{11} &= \sqrt{n_1^2 \frac{\omega^2}{c_1^2} - k_{zm}^2}, & k_{12} &= \sqrt{n_1^2 \frac{\omega_1^2}{c_1^2} - k_{zm}^2}, \\ k_{21} &= \sqrt{n_2^2 \frac{\omega_2^2}{c_{21}^2} - k_{zm}^2}, & k_{22} &= \sqrt{n_2^2 \frac{\omega_3^2}{c_{22}^2} - k_{zm}^2}, \\ k_{31} &= \sqrt{n_3^2 \frac{\omega_4^2}{c_3^2} - k_{zm}^2}. \end{aligned} \tag{5}$$

Для кусочно-однородной конфигурации, показанной на рис. 1, преобразования мод на границах раздела сред не происходит. В этом случае распространяющиеся в волноводе моды, характеризующиеся индексами  $m$ , между собой не взаимодействуют и можно независимо рассматривать распространение и отражение отдельно каждой моды с индексом  $m$ .

Подстановка искомых решений в граничные условия для компонент поля  $E_y, H_z$  при  $x = ut$ ,  $x = ut + d$  даёт соотношения между амплитудами  $A_{ij}$  и частотами  $\omega_i$  для каждого типа волн с произвольным индексом  $m$ , который для простоты записи опускается:

$$\begin{aligned} A_{11} e^{i(\omega - uk_{11})t} + A_{12} e^{i(\omega_1 + uk_{12})t} &= A_{21} e^{i(\omega_2 - uk_{21})t} + A_{22} e^{i(\omega_3 + uk_{22})t} - \\ &- \frac{k_{11}}{\omega} A_{11} e^{i(\omega - uk_{11})t} + \frac{k_{12}}{\omega_1} A_{12} e^{i(\omega_1 + uk_{12})t} = \\ &= -\frac{k_{21}}{\omega_2} A_{21} e^{i(\omega_2 - uk_{21})t} + \frac{k_{22}}{\omega_3} A_{22} e^{i(\omega_3 + uk_{22})t}, \\ A_{21} e^{-\frac{i\omega_2 d}{c_{21}} t} e^{i(\omega_2 - uk_{21})t} + A_{22} e^{\frac{i\omega_3 d}{c_{22}} t} e^{i(\omega_3 + uk_{22})t} &= \\ &= A_{31} e^{-\frac{i\omega_4 d}{c_{31}} t} e^{i(\omega_4 - uk_{31})t} - \\ &- \frac{k_{21}}{\omega_2} A_{21} e^{-\frac{i\omega_2 d}{c_{21}} t} e^{i(\omega_2 - uk_{21})t} + \frac{k_{22}}{\omega_3} A_{22} e^{\frac{i\omega_3 d}{c_{22}} t} e^{i(\omega_3 + uk_{22})t} = \\ &= -\frac{k_{31}}{\omega_4} A_{31} e^{-\frac{i\omega_4 d}{c_{31}} t} e^{i(\omega_4 - uk_{31})t}. \end{aligned} \tag{6}$$

Эти соотношения должны выполняться для любого момента времени  $t$ , что приводит к соотношению между частотами волн падающей, отражённой и прошедшей:

$$\begin{aligned} \omega - uk_{11}(\omega) &= \omega_1 + uk_{12}(\omega_1) = \omega_2 - uk_{21}(\omega_2) = \\ &= \omega_3 + uk_{22}(\omega_3) = \omega_4 - uk_{31}(\omega_4), \end{aligned} \tag{7}$$

где частоты:  $\omega_1$  – частота волны, отражённой от левой границы подвижного слоя в первой среде,  $\omega_2$  – частота волны, прошедшей во вторую среду,  $\omega_3$  – частота волны, отражённой от правой границы подвижного слоя 2,  $\omega_4$  – частота волны, прошедшей в среду 3. При скорости движения слоя  $u \neq 0$  все эти частоты отличаются от  $\omega$  – частоты, падающей на слой волны, и зависят от ряда параметров: от скорости движения границы раздела сред  $u$ , от скорости движения каждой из сред  $v_1, v_2, v_3$ , от типа волноводной структуры и от индексов распространяющейся моды.

Следует отметить, что соотношения (7) не зависят от типа волноводной структуры и выполняются для различных типов кусочно-однородных вдоль оси Oz волноводных структур.

### 2. Основные результаты

Рассмотрим основные особенности, которые вносит вариация поля в поперечном к оси волновода направлении. Из (7) следует, что частота  $\omega_1$  отраженной от подвижного слоя волны с индексом  $m$  определяется через частоту  $\omega$  падающей на границу волны с тем же индексом следующим уравнением:

$$\omega - uk_{11mz}(\omega) = \omega_{1m} + uk_{12mz}(\omega_{1m}), \tag{8}$$

которое для плоской структуры, показанной на рис. 1, может быть представлено в виде:

$$\omega - u\sqrt{n_1^2 \frac{\omega^2}{c^2} - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2} = \omega_{1m} + u\sqrt{n_1^2 \frac{\omega_{1m}^2}{c^2} - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2} \tag{9}$$

(здесь  $c_1 = c$ ). Для волновых чисел падающей и отражённой волн соотношение принимает вид:

$$k - \frac{u}{c}\sqrt{n_1^2 k^2 - k_{zm}^2} = k_{1m} + \frac{u}{c}\sqrt{n_1^2 k_{1m}^2 - k_{zm}^2}. \tag{10}$$

Из (8)–(10) следует, что относительное изменение частоты отражённой волны  $\omega_1$  в волноводе, включающем движущуюся границу раздела сред, зависит от относительной скорости движения слоя  $u/c_1$  и номера моды  $m$ . Наибольшее изменение частоты наблюдается при скоростях движения неоднородностей структуры и заполняющих её сред, сопоставимых со скоростью распространения волн (акустических или электромагнитных).

На рис. 2а, б показана зависимость относительного изменения частоты отражённых волн от относительной скорости движения границы раздела сред  $u/c$  для трёх мод. Если слой 2 неподвижен, тогда  $u/c = 0$  и, как и следует ожидать, эффект Доплера не наблюдается ( $\omega_1/\omega = 1$ ). Увеличение частоты ( $\omega_1/\omega > 1$ ) наблюдается при движении слоя навстречу волне ( $u/c < 0$ ), уменьшение частоты ( $\omega_1/\omega < 1$ ) наблюдается при «убегании» слоя от волны ( $u/c > 0$ ). Увеличение индекса моды приводит к увеличению отклонения относительной частоты  $m$ -й моды от относительной частоты эффекта Доплера для модели одномерной структуры. Эта зависимость сохраняется и для прямоугольного волновода, у которого увеличивается число мод с различным поперечным распределением поля.

В третьей области частоты прошедших волн различных мод  $\omega_{4m}$  в общем случае отличаются от частоты волны, падающей на границу раздела подвижного слоя, и определяются уравнением:

$$\omega - uk_{11m}(\omega) = \omega_{4m} - uk_{31m}(\omega_{4m}). \tag{11}$$

В частности, для плоской структуры

$$\omega - u\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} n_1^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2} = \omega_{4m} - u\sqrt{\frac{\omega_{4m}^2}{c^2} n_3^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}. \tag{12}$$

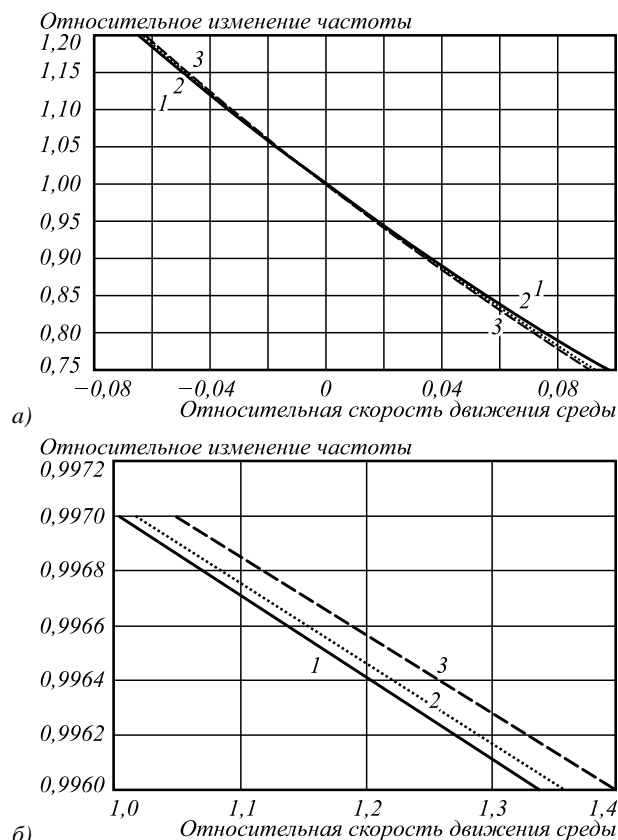


Рис. 2. Зависимость изменения частоты  $\omega_{1m}/\omega$  отражённых волн от относительной скорости  $u/c$  движения границы раздела сред (1:  $m = 1$ ; 2:  $m = 3$ ; 3:  $m = 5$ ,  $\pi c/\omega a = 0,2$ ,  $n_1 = 1,4$ )

Если параметры первой и третьей сред одинаковые ( $n_1 = n_3$ ), тогда в случае прохождения  $m$ -й моды без преобразования моды частота прошедшей волны по отношению к частоте падающей волны не меняется ( $\omega_{4m} = \omega$ ), но, когда прохождение волны сопровождается преобразованием моды, частота меняется. Если параметры 1 и 3 сред разные, то частота прошедшей волны также меняется.

На рис. 3 показана зависимость относительного изменения частоты прошедших волн от относительной скорости движения границы раздела сред  $u/c$  для трёх мод. Относительное изменение частоты также зависит от направления движения границы раздела сред и увеличивается с ростом индекса моды. Наиболее значительно эффект проявляется при скоростях движения неоднородностей и сред, сопоставимых со скоростью распространения волн (релятивистский случай [22, 26–28]).

### 3. Обсуждение

В многомодовой волноводной структуре из-за различия скоростей отдельных мод сдвиг частоты за счёт эффекта Доплера для каждой моды различный. Частоты отражённой волны  $\omega_{1m}$  и прошедшей волны  $\omega_{4m}$  зависят от индекса возбуждаемой моды  $m$ . С увеличением индекса моды  $m$  скорость изменения частоты отражённой волны в зависимости от скорости

движения границы раздела сред  $u/c$  уменьшается, а для прошедшей, наоборот, растёт.

Относительное изменение частоты

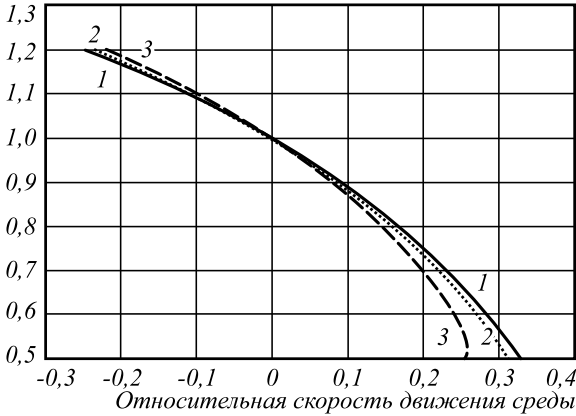


Рис. 3. Зависимость изменения частоты  $\omega_{4m}/\omega$  прошедших волн в зависимости от относительной скорости  $u/c$  движения границы раздела сред (1:  $m = 1$ ; 2:  $m = 3$ ; 3:  $m = 5$ ,  $\pi c/\omega a = 0,2$ ,  $n_1 = 1,4$ ,  $n_3 = 1$ )

Если граница раздела сред является неоднородной (например, слой переменной толщины), то отражение от границы раздела сред в волноводе сопровождается возбуждением высших мод, и каждой из возбуждённых мод соответствует свой доплеровский сдвиг отражённой и прошедшей волн. Спектры отражённого и прошедшего сигналов обогащаются как увеличением числа мод, так и увеличением числа частот в отражённой и прошедшей волнах (каждой моде соответствует своя частота). Если на границу раздела падает основная волна ( $m = 1$ ), частоты отражённых мод  $\omega_{1m}$  и частоты прошедших мод  $\omega_{4m}$  определяются уравнениями:

$$\omega - u \sqrt{n_1^2 \frac{\omega^2}{c^2} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} = \omega_{1m} + u \sqrt{n_1^2 \frac{\omega_{1m}^2}{c^2} - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}, \quad (13)$$

$$\omega - u \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} n_1^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} = \omega_{4m} - u \sqrt{\frac{\omega_{4m}^2}{c^2} n_3^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}. \quad (14)$$

Движение неоднородного слоя приводит к формированию многомодового режима и соответствующего ему многочастотного эффекта Доплера.

Частоты отражённых и прошедших в третью среду волн всех мод не зависят от параметров второй среды. Отметим, что если параметры первой и третьей сред одинаковые ( $n_1 = n_3$ ), то прохождение основной моды ( $m = 1$ ) не приводит к сдвигу частоты прошедшей волны и  $\omega = \omega_{41}$ . Однако частоты прошедших волн более высокого порядка ( $m > 1$ ), которые могут возбуждаться неоднородностями структуры, не совпадают с частотой падающей волны ( $\omega \neq \omega_{4m}$ ). В частном случае одномерной структуры ( $m = 0$ ) для подвижной границы раздела в свободном пространстве ( $u/c \neq 0$ ) имеем известные соотношения для отражённой [1, 2, 4] и прошедшей волн:

$$\omega_1 = \frac{c_1 - u}{c_1 + u} \omega, \quad \omega_4 = \frac{c_1 - u}{c_3 - u} \omega. \quad (15)$$

Если граница раздела сред движется в направлении распространения падающей волны (скорости  $u$  и  $c_1$  по направлению совпадают), то частота отражённого сигнала меньше частоты падающей волны  $\omega_1 < \omega$ ; если граница движется навстречу падающей волне, то  $\omega_1 > \omega$ . Для прошедшей волны уменьшение или увеличение частоты доплеровского сдвига зависит от соотношения скоростей распространения волн в первой и третьей средах и, если скорости волн в этих средах совпадают, доплеровский сдвиг для прошедших волн не наблюдается.

Изменение частот отражённых и прошедших волн различной физической природы зависит от скорости движения границы раздела сред и скорости самих сред, наблюдается при любых движениях сред. Наиболее сильно этот эффект проявляется при скоростях движения неоднородностей и сред, сопоставимых со скоростью распространения волн. Для электромагнитных волн в этих средах (рис. 2, 3) эти эффекты проявляются при взаимодействии, например, с потоком релятивистских электронов [26] или неоднородностью среды, формируемой волновыми импульсами, в том числе сверхсветовыми, скорость которых в активной среде может превышать скорость света [29]. Рассмотренные эффекты Доплера наблюдаются и для акустических волн в многомодовом волноводе. В этом случае скорость движения неоднородностей, сопоставимая со скоростью распространения волн, встречается достаточно часто.

### Заключение

Сдвиг частоты в эффекте Доплера зависит от скорости движения подвижного слоя, от индекса моды волн, скорости распространения которых в волноводе различаются. В многомодовых волноводных структурах с подвижными средами может наблюдаться многочастотный эффект Доплера. Каждой из возбуждённых мод соответствует свой сдвиг частоты отражённого или прошедшего через слой сигнала. Этот сдвиг частоты растёт с увеличением скорости движения подвижного слоя. Доплеровский сдвиг частоты зависит от индекса моды и с ростом индекса степень зависимости уменьшается. Для каждой моды имеется критическое значение скорости движения границы, при превышении которой наблюдается отсечка волнового процесса. Если среды, заполняющие волновод обладают дисперсией частоты, то спектры отражённого и прошедшего через слой сигналов меняются как за счёт эффекта Доплера, так и за счёт дисперсии параметров сред.

### Литература

1. Ландсберг, Г.С. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов / Г.С. Ландсберг. – 6-е изд. – М.: Физматлит, 2003. – 848 с. – ISBN: 5-9221-0314-8.

2. **Eden, A.** The search for Christian Doppler / A. Eden. – Wien: Springer-Verlag, 1992. – 136 p. – ISBN: 978-3-7091-7378-7.
3. **Seddon, N.** Observation of the inverse Doppler effect / N. Seddon, T. Bearpark // *Science*. – 2003. – Vol. 302, Issue 5650. – P. 1537-1540. – DOI: 10.1126/science.1089342.
4. **Schuster, P.M.** Moving the stars: Christian Doppler, his life, his works and principle and the world after / P.M. Schuster. – Pöllauberg, Austria: Living Edition Publishers, 2005. – 232 p. – ISBN: 978-3-901585-05-2.
5. **Kozyrev, A.B.** Explanation of the inverse Doppler effect observed in nonlinear transmission lines / A. Kozyrev, D.W. van der Weide // *Physical Review Letters*. – 2005. – Vol. 94(20). – P. 203902. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.203902.
6. **Glushchenko, A.G.** Media movement effect on elastic waves propagation in planar waveguides / A.G. Glushchenko, E.P. Glushchenko, V.V. Ivanov, E.S. Ustinova // *Eastern European Scientific Journal*. – 2013. – Vol. 6. – P. 38-42. – DOI: 10.12851/EESJ201312ART07.
7. **Харитонов, С.И.** Моделирование отражения электромагнитных волн от дифракционных решёток, нанесённых на произвольную поверхность / С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский, Л.Л. Досколович, Ю.С. Стрелков // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 194-202. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-194-202.
8. **Горбань, И.И.** Отражение и преломление акустических лучей на подвижной границе раздела сред / И.И. Горбань // *Акустичний Вістник*. – 2004. – Т. 7, № 2. – С. 36-41.
9. **Ивахник, В.В.** Пространственно-временные характеристики квазивырожденного четырёхволнового преобразователя излучения в прозрачной среде с учётом электрострикции и эффекта Дюфура / В.В. Ивахник, М.В. Савельев // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 486-491. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-486-491.
10. **Кузелев, М.В.** Аномальный эффект Доплера и вынужденный эффект Черенкова в плазменном волноводе с тонким трубчатым пучком электронов / М.В. Кузелев, А.А. Рухадзе // *Физика плазмы*. – 2005. – Т. 31, № 8. – С. 693-700.
11. **Игнатов, Ю.А.** Аномальный эффект Доплера при распространении магнитостатических волн в ферромагнитных плёнках и в структурах феррит-диэлектрик-металл / Ю.А. Игнатов, А.А. Климов, С.А. Никитов // *Радиотехника и электроника*. – 2010. – Т. 55, № 4. – С. 480-487.
12. **Лазарев, Ю.Ф.** Запаздывание сигналов и эффект Доплера / Ю.Ф. Лазарев // *Вісник НТУУ "Київський політехнічний інститут"*. Серія Приладобудування. – 2011. – Вип. 41. – С. 168-179.
13. **Карташов, И.Н.** Коллективный эффект Черенкова и аномальный эффект Доплера / И.Н. Карташов, М.В. Кузелев, А.А. Рухадзе, Д.Н. Сепехри // *Журнал технической физики*. – 2005. – Т. 75, № 3. – С. 15-23.
14. **Li, G.** Doppler effect in nonlinear optics / G. Li, T. Zentgraf, S. Zhang // *Nature Physics*. – 2016. – Vol. 12. – P. 736-740. – DOI: 10.1038/nphys3699.
15. **Вилов, С.А.** О возможности использования эффекта нелинейного рассеяния акустических волн в медицинской диагностике / С.А. Вилов, И.Н. Диденкулов, А.И. Мартыанов, Н.В. Прончатова-Рубцов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2014. – № 10. – С. 145-153.
16. **Карташов, И.Н.** Пучковые неустойчивости при коллективном эффекте Черенкова и аномальном эффекте Доплера в пространственно ограниченной системе вблизи полосы непрозрачности / И.Н. Карташов, М.В. Кузелев // *Журнал технической физики*. – 2012. – Т. 82, № 4. – С. 62-68.
17. **Garetz, B.A.** Angular Doppler effect / B.A. Garetz // *Journal of the Optical Society of America*. – 1981. – Vol. 71, Issue 5. – P. 609-611. – DOI: 10.1364/JOSA.71.000609.
18. **Dholakia, K.** An experiment to demonstrate the angular Doppler effect on laser light / K. Dholakia // *American Journal of Physics*. – 1998. – Vol. 66, Issue 11. – P. 1007-1010. – DOI: 10.1119/1.19000.
19. **Korech, O.** Observing molecular spinning via the rotational Doppler effect / O. Korech, U. Steinitz, R.J. Gordon, I.Sh. Averbukh, Y. Prior // *Nature Photonics*. – 2013. – Vol. 7. – P. 711-714. – DOI: 10.1038/nphoton.2013.189.
20. **Barsukov, K.A.** The Doppler effect in chiral media / K.A. Barsukov, A.A. Smirnova // *Proceedings of the 1995 International Symposium of Electromagnetic Theory URSI, St. Petersburg*. – 1995. – P. 239-241.
21. **Барсуков, К.А.** Об эффекте Доплера в анизотропной и гиротропной среде / К.А. Барсуков // *ЖЭТФ*. – 1959. – Т. 36, Вып. 5. – С. 1485-1491.
22. **Розанов, Н.Н.** Досветовой и сверхсветовой параметрические эффекты Доплера при отражении света от движущейся плавной неоднородности среды / Н.Н. Розанов // *ЖЭТФ*. – 2012. – Т. 142, № 6(12). – С. 1101-1107.
23. **Устинов, А.В.** Дифракция на аксиконе с учётом нескольких внутренних отражений / А.В. Устинов, С.А. Дегтярев, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 500-507. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-500-507.
24. **Jebbor, N.** A microwave method for complex permittivity extraction of thin materials / N. Jebbor, B. Seddik // *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. – 2012. – Vol. 11, Issue 2. – P. 285-295. – DOI: 10.1590/S2179-10742012000200006.
25. **Collin, R.E.** Foundations for microwave engineering / R.E. Collin. – 2<sup>nd</sup> ed. – Wiley-IEEE Press, 2000. – 944 p. – ISBN: 978-0-7803-6031-0.
26. **Лоза, О.Т.** Генерация сильноточных релятивистских электронных пучков со стабильными в течение микросекунды параметрами с помощью взрывозмиссионных катодов / О.Т. Лоза // *Журнал технической физики*. – 2008. – Т. 78, Вып. 11. – С. 93-98.
27. **Bekhovskaya, K.S.** The use of a high-current electron beam in plasma relativistic microwave oscillators / K.S. Bekhovskaya, I.L. Bogdankevich, P.S. Strelkov, V.P. Tarakanov, D.K. Ul'yanov // *Plasma Physics Reports*. – 2011. – Vol. 37(13). – P. 1119-1124. – DOI: 10.1134/S1063780X11070051.
28. **Розанов, Н.Н.** Сверхсветовой параметрический эффект Доплера в диэлектриках и в электрон-позитронном вакууме / Н.Н. Розанов // *Письма в ЖЭТФ*. – 2012. – Т. 95, Вып. 12. – С. 689-692.
29. **Wang, L.J.** Gain-assisted superluminal light propagation / L.J. Wang, A. Kuzmich, A. Dogariu // *Nature*. – 2000. – Vol. 406, Issue 6793. – P. 277-279. – DOI: 10.1038/35018520.
30. **Розанов, Н.Н.** Параметрический эффект Доплера при отражении света от движущейся плавной неоднородности среды / Н.Н. Розанов // *Оптика и спектроскопия*. – 2012. – Т. 113, № 5. – С. 613-617.

**Сведения об авторах**

**Глущенко Александр Григорьевич**, доктор физико-математических наук (ИРЭ РАН, 1991), профессор (1993), действительный член Академии телекоммуникаций (1996), Российской академии естествознания (2008), Европейской академии естествознания (2008), Мастер связи РФ (1996), Почетный работник Высшей школы РФ (2010). С 1996 по 2012 г. декан факультета базового телекоммуникационного образования, с 1992 г. заведующий кафедрой физики Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Область научных интересов – физические проблемы построения инфо- и телекоммуникационных систем, электродинамика нелинейных композитных структур с анизотропными, нестационарными параметрами, электродинамика субволновых структур, наноструктур, оптика, акустика невзаимных структур. E-mail: [gag646@yandex.ru](mailto:gag646@yandex.ru).

**Глущенко Евгения Павловна**, окончила Поволжскую государственную академию телекоммуникаций и информатики в 2005 г. (ПГАТИ). Кандидат физико-математических наук (2011), доцент кафедры физики Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). В списке научных работ 30 статей, 2 монографии, 4 учебных пособия. Область научных интересов – физические проблемы построения инфо- и телекоммуникационных систем, электродинамика субволновых структур, оптика, акустика субволновых невзаимных структур. E-mail: [gag646@yandex.ru](mailto:gag646@yandex.ru).

**Устинова Елена Сергеевна**, старший преподаватель кафедры информационного и электронного сервиса Поволжского государственного университета сервиса (ПВГУС). В списке научных работ 25 статей, 1 монография, 6 учебных пособий. Область научных интересов – физические проблемы передачи и обработки информации телекоммуникационных систем, электроника. E-mail: [gag@psuti.ru](mailto:gag@psuti.ru).

ГРПТИ: 29.35.19.

Поступила в редакцию 20 декабря 2016 г. Окончательный вариант – 15 июня 2017 г.

**PECULIARITIES OF THE DOPPLER EFFECT IN A MULTIMODE WAVEGUIDE**

A.G. Glushchenko<sup>1</sup>, E.P. Glushchenko<sup>1</sup>, E.S. Ustinova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia,

<sup>2</sup>Volga State University of Service, Samara, Russia

**Abstract**

The paper considers peculiar features of the Doppler effect that occurs when fundamental and higher-order modes reflect at a movable dielectric layer in multimode waveguides. Relationships for calculating frequencies of different modes of waves that reflect at and pass through the dielectric layer are derived. It is established that with increasing order of the mode, its frequency gets less dependent on the layer motion rate for the reflected waves, at the same time showing a stronger dependence for the transmitted waves. The interaction of waves with the inhomogeneous movable layer leads to the excitation of higher-order modes of the reflected and passed waves, so that each mode corresponds to a different frequency shift (multi-frequency Doppler effect).

**Keywords:** multimode waveguides, reflection, multi-frequency Doppler effect.

**Citation:** Glushchenko AG, Glushchenko EP, Ustinova ES. Peculiarities of the Doppler effect in a multimode waveguide. *Computer Optics* 2017; 41(5): 687-693. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-687-693.

**References**

- [1] Landsberg GS. Optics [In Russian]. 6<sup>th</sup> ed. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2003. ISBN: 5-9221-0314-8.
- [2] Eden A. The search for Christian Doppler. Wien: Springer-Verlag; 1992. ISBN: 978-3-7091-7378-7.
- [3] Seddon N, Bearpark T. Observation of the inverse Doppler effect. *Science* 2003; 302(5650): 1537-1540. DOI: 10.1126/science.1089342.
- [4] Schuster PM. Moving the stars: Christian Doppler, his life, his works and principle and the world after. Pöllauberg, Austria: Living Edition Publishers; 2005. ISBN: 978-3-901585-05-2.
- [5] Kozyrev AB, van der Weide DW. Explanation of the inverse Doppler effect observed in nonlinear transmission lines. *Physical Review Letters* 2005; 94(20): 203902. DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.203902.
- [6] Glushchenko AG, Glushchenko EP, Ivanov VV, Ustinova ES. Media movement effect on elastic waves propagation in planar waveguides. *Eastern European Scientific Journal* 2013; 6: 38-42. DOI: 10.12851/EESJ201312ART07.
- [7] Kharitonov SI, Kazanskiy NL, Doskolovich LL, Strelkov YS. Modeling the reflection of the electromagnetic waves at a diffraction grating generated on a curved surface. *Computer Optics* 2016; 40(2): 194-202. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-194-202.
- [8] Gorban II. Acoustic ray reflection and refraction on moving media interface [In Russian]. *Acoustic Bulletin* 2004; 7(2): 36-41.
- [9] Ivakhnik VV, Savelyev MV. Spatial and temporal characteristics of a nondegenerate four-wave radiation converter in a transparent medium based on electrostriction and Dufour effect. *Computer Optics* 2015; 39(4): 486-491. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-486-491.

- [10] Kuzelev MV, Rukhadze AA. Anomalous Doppler effect and stimulated Cherenkov effect in a plasma waveguide with a thin-walled annular electron beam. *Plasma Physics Reports* 2005; 31(8): 638-645. DOI: 10.1134/1.2031624.
- [11] Ignatov YuA, Klimov AA, Nikitov SA. Anomalous doppler effect observed during propagation of magnetostatic waves in ferromagnetic films and ferrite-dielectric-metal structures. *Journal of Communications Technology and Electronics* 2010; 55(4): 449-456. DOI: 10.1134/S106422691004011X.
- [12] Lazarev YuF. Lag signals and Doppler effect [In Russian]. *Bulletin of NTUU "Kyiv Polytechnic Institute", Series Instrument Making* 2011, 41: 168-179.
- [13] Kartashov IN, Kuzelev MV, Rukhadze AA, Sepehri JN. Collective Cherenkov effect and anomalous Doppler effect in a bounded spatial region. *Technical Physics: The Russian Journal of Applied Physics* 2005, 50(3): 298-307. DOI: 10.1134/1.1884728.
- [14] Li G, Zentgraf T, Zhang S. Doppler effect in nonlinear optics. *Nature Physics* 2016, 12: 736-740. DOI: 10.1038/nphys3699.
- [15] Vilov SA, Didenkulov IN, Mart'yanov AI, Pronchatov-Rubtsov NV. The possibility of using the effect of the non-linear acoustical waves scattering in medical diagnosis [In Russian]. *Izvestiya SFedU, Engineering Sciences* 2014, 10: 145-153.
- [16] Kartashov IN, Kuzelev MV. Beam instabilities in the collective Cherenkov effect and anomalous Doppler effect in a spatially bounded system near the nontransparency band. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics* 2012, 57(4): 487-494. DOI: 10.1134/S1063784212040135.
- [17] Garetz BA. Angular Doppler effect. *J Opt Soc Am* 1981; 71(5): 609-611. DOI: 10.1364/JOSA.71.000609.
- [18] Dholakia K. An experiment to demonstrate the angular Doppler effect on laser light. *Am J Phys* 1998; 66(11): 1007-1010. DOI: 10.1119/1.19000.
- [19] Korech O, Steinitz U, Gordon RJ, Averbukh ISH, Prior Y. Observing molecular spinning via the rotational Doppler effect. *Nature Photonics* 2013, 7: 711-714. DOI: 10.1038/nphoton.2013.189.
- [20] Barsukov KA, Smirnova AA. The Doppler effect in chiral media. *Proc 1995 Int Symposium of Electromagnetic Theory URSI 1995*, 239-241.
- [21] Barsukov KA. About the Doppler effect in anisotropic and gyrotropic medium. *JETP* 1959, 9(5): 1052-1056.
- [22] Rozanov NN. Subluminal and superluminal parametric Doppler effect in the case of light reflection from a moving smooth medium inhomogeneity. *JETP* 2012; 115(6): 962-968. DOI: 10.1134/S1063776112130110.
- [23] Ustinov AV, Degtyarev SA, Khonina SN. Diffraction by a conical axicon considering multiple internal reflections. *Computer Optics* 2015, 39(4): 500-507. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-500-507.
- [24] Jebbor N, Seddik B. A microwave method for complex permittivity extraction of thin materials. *J Microw Optoelectron Electromagn Appl* 2012, 11(2): 285-295. DOI: 10.1590/S2179-10742012000200006.
- [25] Collin RE. *Foundations for microwave engineering*. 2nd ed. Wiley-IEEE Press; 2000. ISBN: 978-0-7803-6031-0.
- [26] Loza OT. Generation of high-current relativistic electron beams with stable (for a microsecond) parameters using explosive emission cathodes. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics* 2008; 53(11): 1479-1484. DOI: 10.1134/S1063784208110133.
- [27] Bekhovskaya KS, Bogdankevich IL, Strelkov PS, Taranov VP, Ul'yanov DK. The use of a high-current electron beam in plasma relativistic microwave oscillators. *Plasma Physics Reports*. 2011, 37(13): 1119-1124. DOI : 10.1134/S1063780X11070051.
- [28] Rozanov NN. Superluminal parametric Doppler effect in insulators and in an electron-positron vacuum. *JETP Letters* 2012; 95(12): 609-612. DOI: 10.1134/S0021364012120132.
- [29] Wang LJ, Kuzmich A, Dogariu A. Gain-assisted superluminal light propagation. *Nature* 2000; 406(6793): 277-279. DOI: 10.1038/35018520.
- [30] Rozanov NN. Parametric Doppler effect upon reflection of light from a moving smooth inhomogeneity of the medium. *Optics and Spectroscopy*. 2012, 113(5): 556-559. DOI: 10.1134/S0030400X12110045.

#### Authors' information

**Alexander G. Glushchenko**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (IRE RAS, 1991), Professor (1993), member of the Academy of Telecommunications (1996), the Russian Academy of Natural Sciences (2008), the European Academy of Natural Sciences (2008), Russian Master of Communication (1996), Honorary worker of Higher school (2010). From 1996 to 2012 Dean of Education of Basic Telecommunications faculty, since 1992 Head of Physics department of the Volga State University of Telecommunications and Informatics (PGUTI). Research interests - physical problems of building info- and telecommunication systems, nonlinear electrodynamics of composite structures with anisotropic, non-stationary parameters electrodynamics subwavelength structures, nanostructures, optics, acoustics non-reciprocal structures. E-mail: [gag646@yandex.ru](mailto:gag646@yandex.ru).

**Eugene P. Glushchenko**, graduated from the Volga State Academy of Telecommunications and Informatics in 2005 (PGATI). Candidate of Physical and Mathematical Sciences (2011), assistant professor of physics of the Volga State University of Telecommunications and Informatics (PGUTI). The list of scientific works 30 articles, 2 monographs, 4 textbooks. Research interests - physical problems of building info- and telecommunication systems, electrodynamics, acoustics non-reciprocal subwavelength structures. E-mail: [gag646@yandex.ru](mailto:gag646@yandex.ru).

**Elena S. Ustinova**, senior lecturer of Information and Electronic department service of Volga Region State University of Service (PVGAS). In the list of scientific works 25 articles, 1 monograph, 6 textbooks. Area of scientific interests – physical problems of transmission and processing of information telecommunication systems, electronics. E-mail: [gag@psuti.ru](mailto:gag@psuti.ru).

*Received December 20, 2016. The final version – June 15, 2017.*