

# СОДЕРЖАНИЕ

## ТЕМА НОМЕРА:

### “Системы подвижной связи и цифрового телерадиовещания”

<b>Абрамов В.А., Попов О.Б., Ождин Г.М., Черников К.В.</b> Повышение эффективности регулирования громкости сигналов телерадиовещания . . . .	4
<b>Абрамов В.А., Попов О.Б., Ождин Г.М., Рихтер С.Г.</b> Оценка качества обработки звуковых сигналов в радиовещательных студиях . . . .	6
<b>Александрова О.Ю., Бондаренко С.М., Гутцайт Э.М., Жидков Р.А.</b> Плазменные осветительные устройства на основе СВЧ-разряда . . . . .	9
<b>Андрейко Д.Н., Комаров П.Ю., Игнатов Ф.М.</b> Основные методы сжатия данных в передаче цифровых видеоизображений . . . . .	12
<b>Белов А.С.</b> Адаптивный способ сжатия изображений . . . . .	16
<b>Борисов А.А., Глебович А. А., Ождин Г.М., Чернышева Т.В.</b> Накопление искажений в многозвенных трактах первичного распределения канала звукового вещания . . . . .	19
<b>Бушин Д.С., Игнатов Ф.М.</b> Методы оптимизации определения направления предсказания intra модели кодирования . . . . .	23
<b>Быков В.В., Меньшиков К.В.</b> Помехоустойчивые коды цифрового телевидения . . . . .	30
<b>Быховский М.А.</b> Повышение эффективности использования РЧС при применении в телерадиовещании синхронных сетей . . . . .	34
<b>Варламов О.В.</b> Разработка требований к приемному оборудованию сетей цифрового радиовещания стандарта DRM . . . . .	39
<b>Варламов О.В.</b> Особенности частотно-территориального планирования сетей радиовещания DRM диапазонов НЧ и СЧ . . . . .	43
<b>Варламов О.В.</b> Разработка отечественной нормативной базы цифрового радиовещания стандарта DRM . . . . .	47
<b>Гайнутдинов Т.А., Гаранкина Н.И. Кочержевский В.Г.</b> Исследование способов модернизации действующей передающей радиовещательной антенны АМШП для работы в стандарте DRM . . . . .	51

## Заказ журналов:

- по каталогу "Роспечать" (индекс 80714)
- "Деловая пресса" ([www.delpress.ru](http://www.delpress.ru))
- в редакции ([info@media-publisher.ru](mailto:info@media-publisher.ru))

Возможен также заказ через региональные альтернативные подписные агентства  
<http://www.media-publisher.ru/raspr.shtml>

Стоимость одного экземпляра 300 руб.

## Целевая аудитория по распространению

- Телекоммуникационные компании;
- Дистрибьюторы телекоммуникационного оборудования и услуг;
- Контент-провайдеры;
- Разработчики и производители абонентского оборудования;
- Предприятия и организации нефтегазового комплекса;
- Энергетические компании;
- Автотранспортные предприятия;
- Крупные организации с собственным автомобильным автопарком;
- Компании, занимающиеся железнодорожными, воздушными и морскими перевозками;
- Логистические и экспедиционные компании;
- Провайдеры охранно-поисковых услуг;
- Геодезические и картографические организации;
- Государственные ведомства и организации;
- Строительные компании;
- Профильные учебные заведения

Тираж 3000 экз. + Интернет-версия

## Адрес редакции

111024, Россия, Москва,  
ул. Авиамоторная, д. 8, офис 512-514  
e-mail: [ds@media-publisher.ru](mailto:ds@media-publisher.ru)  
Тел.: +7(495) 957-77-43

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС77-27364

Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции. За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет

Материалы, опубликованные в журнале — собственность ООО "ИД Медиа Паблшер".  
Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя.  
All articles and illustrations are copyright.  
All rights reserved. No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock Company

## Вниманию авторов!

Для начисления авторского гонорара необходимо указать ваши ФИО, почтовый адрес (с индексом), паспортные данные (серия, номер, кем и когда выдан), ИНН, номер свидетельства пенсионного страхования, дату и место рождения, номер телефона.

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается

© ООО "ИД Медиа Паблшер", 2013

[www.media-publisher.ru](http://www.media-publisher.ru)

## Груздев В.В.

Ключевые генераторы с внешним возбуждением класса Е с ППГ-ферровариометром в формирующем П-контуре ..... 57

## Гутцайт Э.М., Маслов В.Э., Агафонова Т.А.

Эффективные светодиодные модули с высоким качеством цветопередачи ..... 60

## Дулов И.В.

Вопросы коррекции характеристик усилителя мощности цифрового СВЧ радиовещания с АРР по питающему напряжению ..... 63

## Елизаров А.А., Ефремова М.В.

Системы формирования электронных пучков в электровакуумных СВЧ-приборах: современное состояние и тенденции развития ..... 70

## Елизаров А.А., Закирова Э.А.

Моделирование излучения крамок многослойных печатных плат СВЧ-диапазона ..... 74

## Елизаров А.А., Каравашкина В.Н.

Конструктивно-технологические особенности устройств на замедляющих системах с аномальной дисперсией ..... 77

## Елизаров А.А., Шаймарданов Р.В.

Исследование электродов для внутриволновой микроволновой физиотерапии с экранировкой магнитного поля ..... 82

## Жук А.П., Орёл Д.В.

Ускоренный численный метод приближенного вычисления значений логарифмической функции для решения задачи формирования систем квазиортогональных кодовых последовательностей ..... 85

## Иванюшкин Р.Ю., Юрьев О.А.

Проблематика построения РЧ-тракта передатчиков цифрового радиовещания диапазона СВЧ на основе метода Л. Кана ..... 91

## Карлушин К.А., Медведева Е.В.

Метод выделения движущихся объектов в видеозображениях на основе трехмерных цепей маркова ..... 94

## Комаров С.Н., Тertyшников А.В.

Разработка и исследование многофазных синтезаторов радиочастот с мощным выходом ..... 97

## Косичкина Т.П., Хасьянова Е.Р.

Анализ влияния характеристик квадратурных преобразователей на работу радиоприемных устройств цифровых сигналов радиосвязи и телерадиовещания ..... 100

<b>Кузнецов А.Л., Бусаев О.Г.</b> Исследование различимости цвета .....	104
<b>Лорей Н.А.</b> Оценка требований к производительности измерительного комплекса, обслуживающего средства подвижной радиосвязи .....	106
<b>Мирошникова Н.Е.</b> Обзор систем когнитивного радио .....	108
<b>Мирошникова Н.Е.</b> Влияние ошибок синхронизации на прием цифровых сигналов .....	112
<b>Орлов В.Г., Пушкарев А.В.</b> Перспективы развития мобильного видео .....	115
<b>Панкратов Д.Ю.</b> Моделирование пропускной способности радиоканала системы MIMO в условиях пространственно коррелированных замираний .....	118
<b>Петренко А.А., Кирик Ю.М.</b> Перспективы применения радиорелейных линий в новых частотных диапазонах 60-80 ГГц .....	120
<b>Рихтер С.Г., Смирнов А.В.</b> Оценка скорости абонента системы Mobile Wimax ...	123
<b>Самойлов А.Г., Самойлов С.А.</b> Концепция согласования радиопередающих устройств с нагрузками .....	127
<b>Смирнов А.В., Горгадзе С.Ф.</b> Принципы повышения эффективности усиления сигнала с большим пик-фактором .....	132
<b>Захарова С.С., Солнцев В.А.</b> Свойства излучения синхронной спирали на обратной волне .....	135
<b>Суворов К.А.</b> Системы виртуальной реальности и их применение ...	140
<b>Федотова Т.Н.</b> Исследование фазовых и частотных характеристик многослойных взаимных ферритовых фазовращателей .....	144

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, рекомендуемый ВАК Минобрнауки России для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание кандидатских и докторских диссертаций.

**Учредитель**  
ООО "Издательский дом Медиа Паблицер"

**Главный редактор**  
В.О. Тихвинский

**Издатель**  
С.С. Дымкова  
ds@media-publisher.ru

**Редакционная коллегия**  
А.С. Аджамов, Е.Б. Алексеев,  
Альберт Вааль, А.А. Гоголь,  
Юлиус Головачев, В.Л. Горбачев,  
Ю.А. Громаков, А.И. Демьянов,  
Б.В. Зверев, Ю.Б. Зубарев, В.Р. Иванов,  
Юрий Кирхгесснер, Т.А. Кузюкова,  
В.Н. Лившиц, С.Л. Мищенко,  
О.Е. Наний, Н.П. Резникова,  
И.В. Парфенов, Ш.Ж. Сеилов,  
В.О. Тихвинский, В.В. Фронов,  
Майкл Шарп, А.Б. Юрчук

**Редакция**

**Выпускающий редактор**  
Андрей Волков  
va@media-publisher.ru

**Специалист по маркетингу и PR**  
Кристина Маркарова  
kristina@media-publisher.ru

**Директор отдела развития и рекламы**  
Ольга Дорошкевич  
ovd@media-publisher.ru

**Отдел распространения и подписки**  
info@media-publisher.ru

**Предпечатная подготовка**  
ООО "ИД Медиа Паблицер"

**Поддержка Интернет-портала**  
Сергей Алексанян

[www.media-publisher.ru](http://www.media-publisher.ru)

## Моделирование излучения кромок многослойных печатных плат СВЧ-диапазона

**Ключевые слова:** многослойная печатная плата, микрополосковые устройства, функции Грина, дифракция, поверхностные и пространственные волны.

Елизаров А.А., д.т.н., профессор, МИЭМ НИУ ВШЭ  
Закирова Э.А., аспирант МИЭМ НИУ ВШЭ

Одним из приоритетных направлений развития современных печатных плат является переход от двумерных конструкций к трехмерным многослойным структурам. При этом решение задач анализа микрополосковых СВЧ устройств на таких многослойных платах подтверждает возможность обеспечения заданного распределения электромагнитного поля в структуре и, как следствие, улучшения выходных параметров проектируемого устройства [1, 2].

Несмотря на многообразие существующих методов и технологий проектирования многослойных печатных плат, особую роль в СВЧ диапазоне играют используемые материалы и конфигурации проводников и диэлектриков, которые в радиоволновом диапазоне практически не оказывают влияния на информативный сигнал. Так при проектировании микрополосковых СВЧ устройств выбор материала проводников необходимо проводить с учетом оценки потерь на излучение и скин-эффект, а при выборе диэлектриков – учитывать, что при скорости передачи информации 1 Гбит/с и выше, тангенс угла диэлектрических потерь слоев печатной платы должен быть минимальным (не более 0,001). Кроме того, необходимо учитывать и потери на частотную дисперсию, которая начинает проявляться на частотах гигагерцового диапазона наряду с дисперсией диэлектрической проницаемости (пространственной дисперсией), оказывая значительное влияние на целостность передачи информативного сигнала [3, 4].

Особую роль при проектировании микрополосковых СВЧ устройств играют потери на паразитное излучение кромок многослойных печатных плат. Сочетание металлических и диэлектрических элементов плат усложняет физические процессы в таких структурах, приводит к явлениям дифракции, взаимной трансформации типов волн, их излучению и переизлучению [5].

Рассмотрим предложенную авторами конструкцию модифицированной печатной платы с подвешенной подложкой [6]. Отличительной особенностью такой платы является то, что диэлектрическая подложка выполняется многослойной, с числом слоев не менее трех, толщиной

каждого слоя равной четверти рабочей длины волны и линейно уменьшающимся от плоскости экрана к плоскости импедансных проводников волновым сопротивлением (рис. 1). Использование такой конструкции платы позволяет обеспечить согласование ее диэлектрических слоев между собой с линейным уменьшением их волнового сопротивления от плоскости экрана к плоскости импедансных проводников, что позволяет избежать возникновения отраженной волны в поперечном сечении, и проектировать микрополосковые СВЧ устройства с улучшенными характеристиками [7].

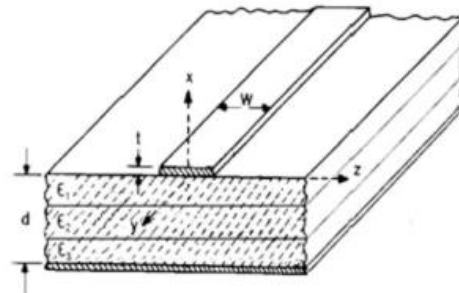


Рис. 1. Модифицированная печатная плата с подвешенной подложкой

Ниже проводится аналитическое моделирование излучения кромок многослойной печатной платы, выполненное на основе соотношений, полученных в работе [5], а также подтвержденное с помощью программных средств MathCAD.

В качестве первой модели рассмотрим излучение открытого конца однослойного плоскопараллельного волновода, который имитирует обрыв микрополосковой структуры. Основным интерес в этом случае представляют колебания типа  $E_0$  при условии, что  $d/\lambda \ll 1$ . Для упрощения математических выкладок рассмотрим двумерную

задачу, при условии, что  $\frac{\partial}{\partial y} = 0$ . Используя аппарат тензорных функций Грина, получим выражения для источников – поверхностных плотностей электрического  $J^s$  и магнитного  $J^M$  токов, связанных с электромагнитными полями  $E$  и  $H$  в виде:

$$E(r) = \int_S \bar{G}_{11}(r, r') J^z(r') dS + \int_S \bar{G}_{12}(r, r') J^M(r') dS$$

$$H(r) = \int_S \bar{G}_{21}(r, r') J^z(r') dS + \int_S \bar{G}_{22}(r, r') J^M(r') dS$$

где  $r$  – точка наблюдения,  $r'$  – точка источника.

С учетом условия  $d \ll \lambda$ , действие открытого конца волновода можно заменить излучением магнитного тока  $J^M = \frac{1}{d} a_y$ , ( $a_y$  – единичный вектор). Анализ разделения поля на пространственные и поверхностные волны при использовании разложения тензоров Грина по системе собственных волн  $LE, LM$  показывает, что в неограниченной диэлектрической подложке поверхностная волна переносит часть мощности первичного источника. При удалении от границы раздела воздух-диэлектрик компоненты поля поверхностной волны убывают экспоненциально, т.е. эта волна не дает вклад в поле излучения в волновой зоне. При вычислении поля в волновой зоне от пространственной волны можно использовать метод перевала, суть которого состоит в приближенной оценке интегралов вида

$$I(\rho) = \int_C \varphi(\xi) e^{\rho f(\xi)} d\xi$$

при больших значениях параметра  $\rho$  – объемной плотности зарядов.

При условии, что функции  $\varphi(\xi)$  и  $f(\xi)$  являются аналитическими на контуре интегрирования  $C$ , получим:

$$I(\rho) \approx e^{\rho f(\xi_0)} \sqrt{\frac{2\pi}{-\rho f''(\xi_0)}} \varphi(\xi_0) + o(\rho^{-3/2})$$

где  $\xi_0$  – корень уравнения  $f'(\xi_0) = 0$ .

Переходя к полярной системе координат  $x = \rho \sin \theta$ ,  $z = \rho \cos \theta$ , получим диаграмму направленности открытого конца плоскопараллельного волновода или кромки однослойной микрополосковой структуры в виде

$$F_1(\theta) = \left[ 1 + j \frac{kd(\varepsilon_1' - \cos^2 \theta)}{\varepsilon_1' \sin \theta} \right]^{-1} \quad (1)$$

Влияние обрыва однослойной диэлектрической подложки на характеристики излучения исследуется на основе второй модели, содержащей кромку структуры и ограниченный участок диэлектрической подложки.

Обрыв слоя диэлектрика приводит к тому, что электрические токи на экране, индуцированные компонентой поля  $H_y^S$ , существуют на ограниченном участке экрана длиной  $L$ . Такая площадка с током является излучающей, т.е. происходит частичная трансформация поверхностной неизлучающей волны в пространственную излучающую волну.

Для определения вклада в поле излучения этого дополнительного источника найдем поверхностную плотность электрического тока на экране, интегрируя это выражение с компонентой функции Грина  $\bar{G}_{21,32}$ . Используя далее метод перевала, получим для дальней зоны формулу для компоненты напряженности магнитного поля в случае однослойной печатной платы:

$$H_y^S = -\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \sqrt{\frac{1}{\lambda \rho}} e^{-j(k\rho - \frac{\pi}{4})} F_2(\theta)$$

где

$$F_2(\theta) = \alpha k L \sin \theta e^{-j\beta k L / 2} \frac{\sin(\beta k L / 2)}{\beta k L / 2} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\varepsilon_1' - 1}{\varepsilon_1'} k d, \quad \beta \approx 1 + \frac{\alpha^2}{2} - \cos \theta.$$

Здесь  $F_2(\theta)$  представляет собой диаграмму направленности линейного электрического тока, бегущего вдоль оси  $oz$  с замедленной фазовой скоростью. Фазовый центр излучения находится в точке  $z = L / 2$ .

Другим источником дополнительного вторичного излучения является скачок компонент поля  $E_x^S$  и  $H_y^S$  в сечении по всей высоте структуры  $-d \leq x \leq \infty$ . Используя ту же методику, что и в предыдущем случае, получим:

$$H_y^S = -\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \sqrt{\frac{1}{\lambda \rho}} e^{-j(k\rho - \frac{\pi}{4})} (1 + \cos \theta) \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \sin^2 \theta} e^{-j\beta k L (1 - \cos \theta)}$$

Из последней формулы следует выражение для диаграммы направленности

$$F_3(\theta) = (1 + \cos \theta) \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \sin^2 \theta} e^{-j\beta k L (1 - \cos \theta)},$$

где  $F_3(\theta)$  является диаграммой линейного распределения синфазно возбуждаемых элементов Гюйгенса (множитель  $(1 + \cos \theta)$ ) с убыванием амплитуды по экспоненциальному закону при удалении от экрана.

Таким образом, аналитическое выражение для диаграммы направленности кромки тонкой однослойной микрополосковой структуры с учетом обрыва диэлектрической подложки определяется тремя составляющими или суммой (1), (2) и (3):

$$F(\theta) = \left[ 1 + j \frac{kd(\varepsilon_1' - \cos^2 \theta)}{\varepsilon_1' \sin \theta} \right]^{-1} + \alpha k L \sin \theta e^{-j\beta k L / 2} \frac{\sin(\beta k L / 2)}{\beta k L / 2} + (1 + \cos \theta) \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \sin^2 \theta} e^{-j\beta k L (1 - \cos \theta)}$$

В случае многослойной печатной платы необходимо суммировать полученные слагаемые для каждого из слоев. На рис. 2а-в представлены полученные с помощью MathCAD составляющие диаграммы направленности для однослойной, трехслойной и пятислойной печатной платы, которые соответствуют излучению кромки структуры  $F_1(\theta)$ , тока на подложке  $F_2(\theta)$  и распределения элементов Гюйгенса в плоскости обрыва подложки  $F_3(\theta)$ .

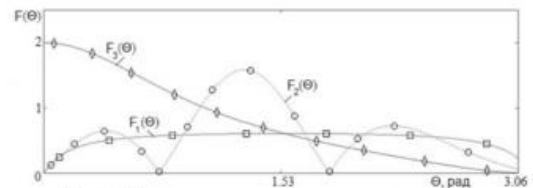
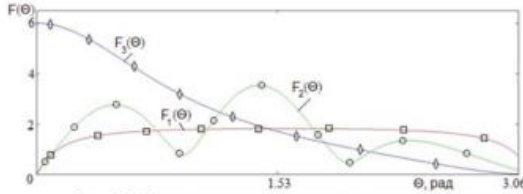
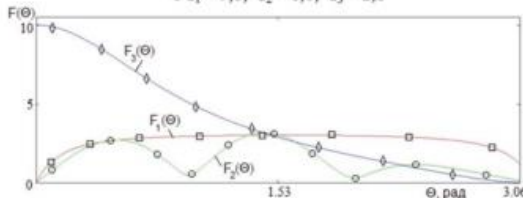


Рис. 2а. Составляющие диаграммы направленности для однослойной печатной платы с  $\varepsilon_1 = 9,8$

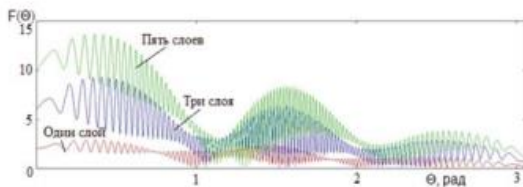
Рис. 3 демонстрирует суммарные диаграммы направленности  $F(\theta)$  для однослойной, трехслойной и пятислойной печатной платы.



**Рис. 26.** Составляющие диаграммы направленности для трехслойной печатной платы с  $\epsilon_1 = 9,8$ ;  $\epsilon_2 = 6,0$ ;  $\epsilon_3 = 2,8$



**Рис. 2в.** Составляющие диаграммы направленности для пятислойной печатной платы с  $\epsilon_1 = 16,0$ ;  $\epsilon_2 = 9,8$ ;  $\epsilon_3 = 6,0$ ;  $\epsilon_4 = 3,8$ ;  $\epsilon_5 = 2,8$



**Рис. 3.** Суммарные диаграммы направленности  $F(\theta)$  для однослойной, трехслойной и пятислойной печатной платы

Кривая  $F(\theta)$  имеет колебательный характер, число осцилляций и их амплитуда возрастают с увеличением числа слоев, а также размера подложки  $L/\lambda$ , т.к. возможности интерференции волн, излученных отдельными токами, при этом увеличиваются. Отклонение от первоначальной диаграммы направленности кромки  $F_l(\theta)$  становится менее заметным с уменьшением относительной диэлектрической проницаемости материала слоев и относительной толщины подложки  $d/\lambda$ .

Анализ полученных кривых позволяет сделать вывод о том, что задача об излучении кромки многослойной печатной платы во многом сходна с решением задачи о дифракции волн на синусоидальной фазовой решетке [8], представляющей собой в простейшем случае слой диэлектрика с периодически меняющейся толщиной. При этом дифракционная картина содержит большое число максимумов, а энергия в зависимости от глубины фазового рельефа, перераспределяется между составляющей нулевого и более высокого порядков. В случае исчезновения нулевого порядка дифракции, вся падающая на дифракционную решетку энергия распределяется по боковым лепесткам.

**Литература**

1. Елизаров А.А., Закирова Э.А. Инновационные технологии проектирования многослойных печатных плат диапазона СВЧ // Материалы международной научно-практической конференции «Инновационные информационные технологии». – Прага, 2012. – С.408-411.
2. Елизаров А.А., Закирова Э.А. Исследование многослойной печатной платы с подвешенной подложкой для микрополосковых СВЧ устройств // Труды LXVII Научной сессии, посвященной Дню радио. – Москва, 2012. – С.366-369.
3. Елизаров А.А., Закирова Э.А. О необходимости учета дисперсии при оценке ЭМС многослойных печатных плат микроволнового диапазона // Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств. Сборник научных трудов под ред. Л.Н.Кечиева. – М.: МИЭМ, 2012. – С.36-39.
4. Елизаров А.А., Закирова Э.А. Анализ паразитных колебаний и волн в микрополосковых линиях с учетом многомодовой дисперсии // Технологии ЭМС, № 3(42), 2012. – С.69-72.
5. Электродинамический расчет характеристик полосковых антенн / Б.А.Панченко, С.Т.Князев и др. – М.: Радио и связь, 2002. – 256 с.
6. Патент РФ на изобретение по заявке № 2010123341. Печатная плата с подвешенной подложкой // А.А.Елизаров, Э.А.Закирова. Приоритет от 08.06.2010. Решение о выдаче от 26.06.2012.
7. Патент РФ на полезную модель по заявке № 2012121431. Микрополосковый фильтр на штыревой гребенке с многослойной подложкой // А.А.Елизаров, Э.А.Закирова. Приоритет от 24.05.2012. Решение о выдаче патента от 23.08.2012.
8. Гринев А.Ю. Основы радиооптики. Учебное пособие. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2003. – 80 с.

**Radiation of edges multilayered printed-circuit boards of microwave range modelling**

Yelizarov A.A., Zakirova E.A.

**Abstract**

The analysis of two models multilayered printed-circuit board of microwave range – the first in a kind of the open end of plane-parallel wave guide simulating an edge of microstrip infinite structure, and the second – structure containing an edge and the limited site of a dielectric substrate is carried out. By means of the method tensor Green's functions and software MathCAD analytical correlations are received and modeling of direction's diagrams of radiation of considered models which correspond to radiation of an edge structure, a current on a substrate and assignments of Gijugen's elements in a plane of breakage's substrate is executed. The analogy between radiation of an edge multilayered printed-circuit board and diffraction of waves on a sinusoidal phase lattice is spent.

**Keywords:** multilayered printed-circuit board, microstrip devices, Green's function, diffraction, surface and space waves.