

2. Wolfe C. M., Stillman G. E. Proc. of the 3<sup>th</sup> Intern. Symp. on Gallium Arsenide.— Aachen, 1970, p. 3.
3. Stillman G. E., Wolfe C. M.— Thin Sol. Films, 1976, v. 31, № 1, p. 69.
4. Stillman G. E., Wolfe C. M., Dimmock J. O.— J. Phys. Chem. Sol., 1970, v. 31, № 6, p. 1199.
5. Hill D. E.— J. Appl. Phys., 1970, v. 41, № 7, p. 1815.
6. Whitaker J., Bolger D. E.— Sol. St. Com., 1966, v. 4, № 3, p. 181.
7. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л.— ЖЭТФ, 1970, т. 60, № 2, с. 867.
8. Леванюк А. П., Осипов В. В.— ФТП, 1973, т. 7, № 8, с. 1575.
9. Арнаудов Б. Г., Быковский В. А., Домаевский Д. С.— ФТП, 1975, т. 9, № 12, с. 2338.
10. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л.— ФТП, 1970, т. 4, № 2, с. 305.
11. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л.— ЖЭТФ, 1971, т. 61, № 2(8), с. 816.
12. Efros A. L., Shklovskii B. I., Yanchev I. Y.— Phys. Stat. Sol., 1972, v. 50, № 1, p. 45.

Поступила в редакцию  
19.03.79.

Кафедра физики полупроводников

УДК 621.396.672

В. М. ЗЕЛЕНКЕВИЧ, А. С. КЛЮЧНИКОВ, Л. М. ТИМОФЕЕВ

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ СИСТЕМЫ АНТЕННА — РПУ

Необходимость защиты радиотехнических систем от различных внешних воздействий, в том числе и от атмосферных, делает незаменимым использование радиопрозрачных укрытий (РПУ). Необходимость оценки влияния РПУ на характеристики антенн требует разработки наиболее оптимальных электродинамических методов расчета.

Целью данной работы является сравнительный анализ существующих методов расчета диаграммы направленности (ДН) системы антенна — РПУ и разработка более эффективного метода расчета с точки зрения точности и простоты алгоритмизации.

Основу метода прослеживания хода лучей составляет интегральное представление зависимости распределения поля в дальней зоне от распределения токов по произвольному раскрытию в виде скалярного интеграла Кирхгофа [1, 2]. Для этого метода характерны ограничения:

- а) рассматриваются остронаправленные антенны и РПУ с достаточно большим радиусом кривизны;
- б) для падающего и прошедшего полей используется аппроксимация плоской волны и плоскопараллельного слоя.

Практические расчеты реальных трехмерных конструкций антенна — РПУ с помощью этого метода показали, что он малоприменим для расчета антенн с размером раскрытия  $a \geq 25\lambda$ , так как с увеличением размеров раскрытия затраты машинного времени растут пропорционально  $\sim ka^2$  при условии сохранения заданной точности расчета. Для раскрытия  $a \approx 25\lambda$  погрешность меньше 21% (в области главного лепестка) и не превосходит 26% (в области первых боковых лепестков).

Одним из известных методов электродинамического расчета систем антенна — РПУ является метод, использующий для расчета ближних полей укрываемой антенны векторизованные формулы Кирхгофа [3]. В рассматриваемом методе принимаются следующие упрощения:

- а) модули векторов  $H$ ,  $E$  или величины токов на некоторой части поверхности пренебрежимо малы;
- б) излучение происходит по внешним нормальным к поверхности излучающей апертуры;
- в) векторы  $E$  и  $H$  связаны линейной зависимостью (как в случае плоской волны).

Для вычисления ближних полей применялись специально разработанные методы с автоматическим выбором шага интегрирования в зависимости от угла наблюдения, так как интегральные выражения, используемые для расчетов, содержат быстроосциллирующие функции,

и для точного вычисления интегралов необходимо выдержать шаг интегрирования не меньше двух отсчетов на период изменения функции.

Расчет переданных полей основан на традиционной схеме разложения падающего поля на две составляющие, перпендикулярную и параллельную плоскости падения и соединения их на внешней поверхности РПУ в тангенциальную составляющую переданного поля [3].

В связи с большими затратами машинного времени практическая реализация данного метода в настоящее время весьма затруднена для раскрывов размером  $a \geq 10\lambda$ . Для раскрывов размером  $a \approx 8\lambda$  время счета составило 18—20 ч, причем с увеличением размеров раскрыва затраты машинного времени растут  $\sim 4ka^2$ . Таким образом, даже сравнительно невысокая точность расчета характеристик излучения системы антенна — РПУ с помощью данного метода достигается за счет больших затрат машинного времени (см. таблицу).

| Метод             | Число точек интегрирования | Время счета | Максимальное среднеквадратичное отклонение, дБ |                  | Погрешность, %   |                  |
|-------------------|----------------------------|-------------|------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
|                   |                            |             | главный лепесток                               | боковой лепесток | главный лепесток | боковой лепесток |
| Скалярный:        |                            |             |                                                |                  |                  |                  |
| без переотражений | 250                        | 2,3 ч       | 1,3                                            | 2,65             | 12—19            | 15—23            |
| с переотражением  | 250                        | 3,8 ч       | 1,05                                           | 2,02             | 11—16            | 12—20            |
| Векторный         | 250                        | 15 ч        | 1,1                                            | 2,98             | 8—16             | 14—22            |
| БПФ:              |                            |             |                                                |                  |                  |                  |
| без переотражений | 64 × 64                    | 22 мин      | 0,95                                           | 1,95             | 9—12             | 11—16            |
| с переотражением  | 64 × 64                    | 36 мин      | 0,62                                           | 1,27             | 5—9              | 9—12             |

Рассмотренные методы можно отнести к методам прямого интегрирования апертурных полей. Общим недостатком этих методов при практической реализации является большой объем машинного времени, даже при использовании быстродействующих ЦВМ. Кроме того, для расчета ДН системы антенна — РПУ эти методы используют уже известное распределение поля по раскрыву, которое в каждом конкретном случае будет зависеть от типа антенны, погрешностей ее изготовления и т. д., а рассчитанные характеристики могут значительно отличаться от истинных.

Для увеличения точности расчетов и уменьшения их трудоемкости целесообразнее использовать не распределение поля по раскрыву, а саму ДН укрываемой антенны. Нами предлагается метод расчета характеристик излучения системы антенна — РПУ, отличительной особенностью которого является представление системы антенна — РПУ двумерной линейной системой и использование для ее описания функции Грина, которую часто называют откликом линейной системы [4]. Это позволяет определить поле на внешней поверхности укрытия в виде [4]:

$$f_2(\vec{r}_2) = \iint_{S_a} f_1(\vec{r}_a) h(\vec{r}_2 - \vec{r}_a) dS_a, \quad (1)$$

где  $f_1(\vec{r}_a)$  — распределение поля на раскрыве;  $f_2(\vec{r}_a)$  — распределение поля на внешней поверхности РПУ;  $\vec{r}_a$  — радиус-вектор произвольной точки раскрыва;  $\vec{r}_2$  — радиус-вектор точки на поверхности РПУ;  $h(\vec{r}_2 - \vec{r}_a)$  — отклик системы антенна — РПУ на выходе (внешней поверхности РПУ) при подаче на вход (излучающий раскрыв) элементарного сигнала в виде  $\delta$ -функции Дирака.

Поле в раскрыве и диаграмма направленности антенны связаны преобразованием Фурье [5], поэтому, применяя преобразования Фурье к

правой и левой частям уравнения (1) и учитывая теорему свертки, получаем следующее выражение для ДН системы антенна — РПУ [6]:

$$F_{(A-Y)}(p, q) = F_{(A)}(p, q) \Pi^+[h], \quad (2)$$

где  $F_{(A)}$  — диаграмма направленности антенны;  $F_{(A-Y)}$  — диаграмма направленности системы антенна — РПУ;  $p, q$  — пространственные частоты;  $\Pi^+[h]$  — обозначение прямого преобразования Фурье.

Таким образом, математические операции, определяющие ДН системы антенна — РПУ, весьма просты, а использование процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ) существенно упрощает расчет передаточной функции  $H = \Pi^+[h]$  системы антенна — РПУ.

Для нахождения отклика  $h$  используем известное решение Рэлея — Зомерфельда [4]:

$$E(\bar{r}_2) = \frac{1}{2\pi} \iint_{S_a} E(\bar{r}_a) \frac{\partial G}{\partial n} dS_a, \quad (3)$$

где  $S_a$  — поверхность раскрыва;  $\bar{n}$  — единичная нормаль;  $G$  — скалярная функция Грина.

При подаче на вход системы возмущения в виде  $\delta$ -функции мы получим следующее выражение для отклика [6]:

$$h(\bar{r}_2 - \bar{r}_a) = \frac{1}{2\pi} T(\bar{r}_2 - \bar{r}_a) \frac{\partial G(\bar{r}_2 - \bar{r}_a)}{\partial n}, \quad (4)$$

где  $T(\bar{r}_2 - \bar{r}_a)$  — функция, определяющая радиопрозрачность стенки укрытия в точке  $\bar{r}_2$  при помещении возмущения в точку  $\bar{r}_a$ ;  $G = \frac{e^{-ikR}}{R}$ , здесь  $R = [(x_2 - x_a)^2 + (y_2 - y_a)^2 + (z_2 - z_a)^2]^{1/2}$ .

Следует отметить, что решение (4) не является точным решением какой-то конкретной задачи для реальных физических источников, так как исходное распределение предполагалось идеализированным в виде  $\delta$ -функции.

Предлагаемая методика обеспечивает точность расчета выше точности рассмотренных методов, повышение точности расчета которых весьма трудоемко. Для предлагаемого метода затраты машинного времени растут  $\sim \frac{a}{2\lambda} \log_2 a/\lambda$  с увеличением размеров раскрыва.

Известные методы расчета используют для расчета ДН системы антенна — РПУ заданные распределения поля по раскрыву, которые для каждой конкретной антенны одного типа различны, поэтому рассчитанные ДН могут существенно отличаться от экспериментально измеренных. В нашем методе используется ДН антенны, измеренная экспериментально, что позволило устранить трудоемкий процесс пересчета амплитудно-фазового распределения (АФР) поля на раскрыве антенны в поле дальней зоны; это и предопределяет в большей степени более высокую точность метода и его эффективность.

В предлагаемом методе учитываются эффекты переотражения, что позволяет существенно повысить точность расчета ДН в области боковых лепестков. Возможность использования процедуры цифровой фильтрации отклика позволяет также снизить ошибки расчета ДН в дальних боковых лепестках, так как это эквивалентно сглаживанию высокочастотной части спектра [7].

Использование процедур БПФ позволило преодолеть многие математические трудности, не вводя упрощающих предположений, что также повысило точность данного метода. Существенным достоинством предлагаемого метода является то, что с помощью отклика и передаточной характеристики  $\Pi^+[h]$  можно оптимизировать отдельные параметры РПУ, например, его форму или радиопрозрачность, а также выработать некоторые критерии оптимальных РПУ.

При сравнении расчетных и экспериментальных данных основная трудность заключалась в точном моделировании распределения поля по

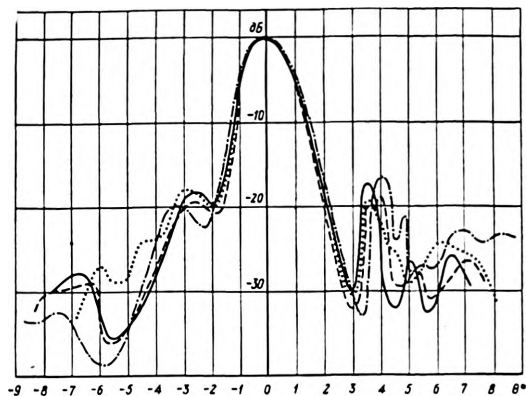


Рис. 1. Диаграмма направленности антенны с укрытием в главной плоскости  $E$ :

— экспериментальная ДН; — скалярный; . . . векторный; — — метод БПФ

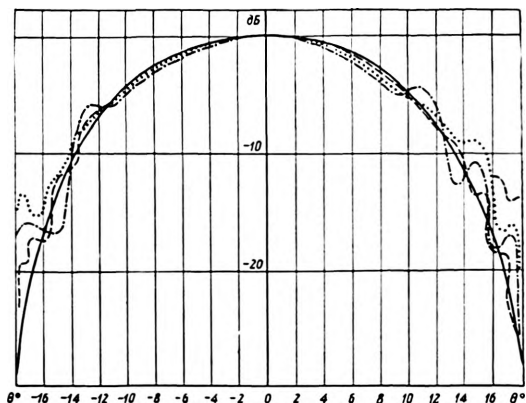


Рис. 2. Диаграмма направленности антенны с укрытием в главной плоскости  $H$ . Обозначения те же, что и на рис. 1

раскрытию для известных методов расчета. Так как в настоящее время не существует строгого решения рассматриваемой задачи, рассчитанные ДН сравнивались с экспериментально измеренными.

На рис. 1, 2 представлены полученные результаты расчета ДН антенны с прямоугольным раскрытием, помещенной внутри укрытия в виде эллипсоида вращения.

В таблице приводятся некоторые качественные оценки результатов расчетов для сравниваемых методик. Сравнительный анализ рассматриваемых методов позволил сделать следующие выводы.

Все рассматриваемые методы с достаточной для практических целей точностью отображают изменение ДН антенны при наличии укрытия в области главного лепестка. Погрешность метода скалярной формулы

Кирхгофа не превышает 21%, векторизованной формулы Кирхгофа  $\leq 16\%$ , метода БПФ  $\leq 12\%$ .

В области боковых лепестков погрешность метода скалярной формулы Кирхгофа 26%, метода векторизованной формулы Кирхгофа  $\leq 20\%$ , метода БПФ  $\leq 16\%$ .

Анализ полученных данных позволяет сделать некоторые рекомендации по разработке оптимального метода расчета систем антенна — РПУ.

При разумных ограничениях и упрощениях метод должен давать хорошее совпадение со строгой теорией или с экспериментальными данными. Процесс вычисления ближних и дальних полей не должен быть трудоемким, т. е. метод практически реализуется на современных ЦВМ средней мощности. При современном положении развития отечественных ЦВМ этому требованию отвечают методы, основанные на операциях интегральных преобразований Фурье или Френеля.

В настоящее время важно знать, как можно точнее, распределение поля в области боковых лепестков. В методе должны быть отражены процессы переотражения и деполяризации, которые существенно влияют на уровень боковых лепестков.

Разработка конструкций антенных РПУ ставит задачу оптимального соотношения формы и размеров РПУ с размерами и местоположением излучающего раскрыва. Простота и экономичность метода должна позволять проводить оптимизацию расчета и проектирования реальных конструкций РПУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tricoles G.— J. Opt. Amer., 1964, v. 54, № 9, p. 1094.
2. Абрамов В. В., Каплун В. А.— Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехн., 1971, вып. 23, с. 14.
3. Peric D. C.— IEEE Transaction, 1970, v. 18, № 1, p. 7.
4. Ключников А. С. Теория волновых процессов.— Минск, 1977.
5. Балклав А.— Изв. АН Латвийской ССР. Сер. физ.-мат. наук, 1962, вып. 9, с. 73.
6. Зеленкевич В. М., Ключников А. С.— Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук, 1978, № 2, с. 68.
7. Joy E. B.— IEEE Transaction, 1972, v. 20, № 3, p. 253.

Поступила в редакцию  
29.03.79.

НИИ ПФП

УДК 539.172.3

*Н. В. ЛОПАРЕВА, В. Л. ГУРАЧЕВСКИЙ*

#### ПОЛЯРИЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА МЕССБАУЭРОВСКИХ МИШЕНЕЙ ИЗ ЕСТЕСТВЕННОГО ЖЕЛЕЗА

Мессбауэровские мишени, помещенные в магнитное поле, обладают ярко выраженными свойствами «оптической» анизотропии в  $\gamma$ -диапазоне [1, 2]. Например, для них возможны аналоги эффектов Фарадея и двойного лучепреломления. Обычно в экспериментах с поляризованными  $\gamma$ -лучами используют высокообогащенные мишени. Представляет значительный интерес получение поляризованных пучков и их анализ в случае применения железной фольги, содержащей естественную примесь изотопа  $Fe^{57}$ . С этой целью рассмотрим выражения для показателей преломления  $\gamma$ -квантов, падающих на намагниченную мишень перпендикулярно к направлению магнитного поля.

Используя теорию, развитую в [1, 2], можно получить следующие явные выражения для показателей преломления  $\gamma$ -квантов, поляризованных перпендикулярно ( $n_1$ ) и параллельно ( $n_2$ ) направлению магнитного поля: