

УДК 621.372.828

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ МЕТОДОМ МАБ

Т. И. Лаврова, В. В. Никольский

В результате дальнейшего развития ранее предложенного авторами метода минимальных автономных блоков (МАБ) создан алгоритм определения полей различных направляющих систем, в частности, полосковых линий. Основным предметом исследования является полосковая линия на ферритовой подложке при трех видах намагничивания, создающего гиротропию. Приводятся численные результаты в виде таблиц, графиков, а также векторной диаграммы, показывающие структуру поля основной волны исследуемой линии.

В [1] были предложены различные варианты применения метода минимальных автономных блоков (МАБ) для анализа собственных волн как продольно-регулярных, так и периодических направляющих систем. Однако рассматривалось лишь нахождение постоянных распространения как функций различных параметров (в частности получение дисперсионных характеристик). При этом в числе других систем анализировались полосковые линии на ферритовой подложке, намагничиваемой разными способами. Предметом данной заметки является определение полей в таких системах.

Будем исходить из экономичного варианта, названного в [1] «методом движения внутри слоя». В этом случае в направляющей системе выделяется поперечный слой МАБ, а открытые (на обе стороны слоя) входы МАБ исключаются при помощи условия Флоке, содержащего неизвестную постоянную распространения. Остаются четыре двумодовых внутренних входа, по которым МАБ характеризуется следующей матрицей рассеяния:

$$S_{\perp} = S^{\perp\perp} + S^{\perp z}(\theta - S^{zz})^{-1}S^{z\perp}, \quad (1)$$

где использованы клетки обычной матрицы рассеяния МАБ

$$S_{\text{МАБ}} = \left(\begin{array}{c|c} S^{\perp\perp} & S^{\perp z} \\ \hline S^{z\perp} & S^{zz} \end{array} \right) \quad (2)$$

(эта матрица 12-го порядка разделена на клетки по принципу выделения внутренних для слоя \perp -каналов и внешних z -каналов), а также фигурирует матрица θ , формализующая условия Флоке (Γ — неизвестная постоянная распространения, Δ_z — толщина слоя),

$$\theta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \exp(i\Gamma\Delta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \exp(i\Gamma\Delta_z) \\ \exp(-i\Gamma\Delta_z) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-i\Gamma\Delta_z) & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Обратимся к рис. 1а, на котором условно изображено поперечное сечение полосковой линии с выделением МАБ (одна сторона рассматри-

ваемого поперечного слоя МАБ). Вертикальная штриховая линия делит слой на левую (л) и правую (пр) части. Объединением всех МАБ этих частей получаются матрицы рассеяния $S_{л}^+$ и $S_{пр}^-$, отнесенные к входам (граням), по которым прошло рассеяние; в этом процессе каждый МАБ характеризуется своей матрицей S_{\perp} (1), и во всех случаях совпадения грани с металлической границей (внешний экран или полосковый проводник) к МАБ присоединяется элемент «короткого замыкания». Таким образом, имеем соотношения

$$S_{л}c_{л}^+ = c_{л}^- \quad \text{и} \quad S_{пр}c_{пр}^+ = c_{пр}^-, \quad (4)$$

где $c_{л}^{\pm}$ и $c_{пр}^{\pm}$ — соответствующие векторы прямых и обратных волн на границе рассеяния. Ввиду условий связи

$$c_{л}^- = c_{л}^+ \quad \text{и} \quad c_{л}^+ = c_{пр}^- \quad (5)$$

имеем два однородных уравнения

$$S_{л}S_{пр}c_{л}^- = c_{л}^- \quad \text{и} \quad S_{пр}S_{л}c_{л}^+ = c_{л}^+, \quad (6)$$

каждое из которых может быть использовано для нахождения постоянной распространения Γ (обращение в нуль детерминанта однородной системы и решение получаемого характеристического уравнения).

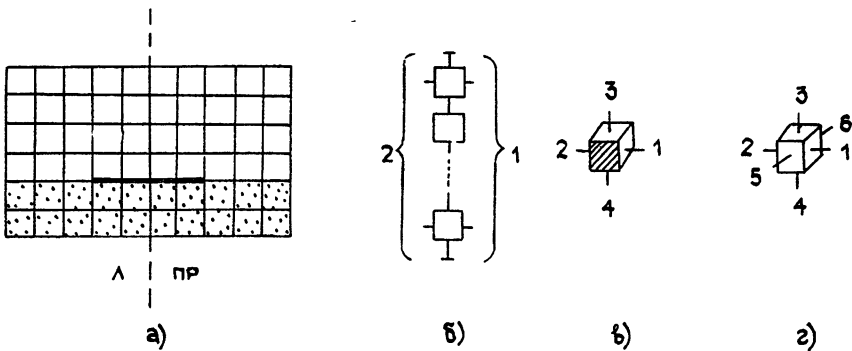


Рис. 1. К построению поля: а) условный вид поперечного сечения линии; б) декомпозиционная схема столбца МАБ, в) единичный МАБ столбец, описываемый матрицей S_{\perp} , г) тот же МАБ, описываемый полной матрицей $S_{МАБ}$.

Последовательность определения структуры поля в поперечном сечении полосковой линии такова:

1. Решается первое из уравнений (6), что дает постоянную распространения Γ и вектор $c_{л}^-$.

2. Из второго уравнения (4) с учетом (5) находится вектор $c_{л}^+$.

3. Рассматривается один — ближайший к границе рассеяния столбец МАБ, например, слева (рис. 1а, б). Находится его матрица рассеяния $S_{ст}$. Пусть группа входов справа, на границе рассеяния (рис. 1а), обозначена номером 1, а группа входов слева — номером 2; это отражено на декомпозиционной схеме столбца (рис. 1б). Разобьем матрицу рассеяния $S_{ст}$ на четыре клетки соответственно этой нумерации. Тогда по простому правилу находится волновая матрица передачи столбца $T_{в}$, пересчитывающая вектор $\begin{pmatrix} c_{л}^+ \\ c_{л}^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1^+ \\ c_1^- \end{pmatrix}$ в $\begin{pmatrix} c_{л'}^+ \\ c_{л'}^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_2^+ \\ c_2^- \end{pmatrix}$ (первый на границе рассеяния, второй — слева). Легко показать, что

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{в}}^{11} &= -(S^{12})^{-1} S^{11}, & T_{\text{в}}^{12} &= (S^{12})^{-1}, \\ T_{\text{в}}^{21} &= S^{21} - S^{22} (S^{12})^{-1} S^{11}, & T_{\text{в}}^{22} &= S^{22} (S^{12})^{-1} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Указанный пересчет производится.

4. Рассматривается отдельно каждый МАБ столбца; один из них помечен крестиком на рис. 1б и показан отдельно на рис. 1в. Используя матрицу S_{\perp} и зная из предыдущего векторы падающих и отраженных волн на входах 1 и 2, определяем эти векторы на входах 3 и 4. Для этого от S_{\perp} надо предварительно перейти к соответствующей волновой матрице передачи, воспользовавшись формулами (7); входы 1, 2 при клеточном разбиении S_{\perp} соответствуют номеру 1, а входы 3, 4 — номеру 2.

5. Теперь для того же МАБ берется его полная матрица рассеяния $S_{\text{МАБ}}$. Входы (рис. 1г) разбиваются на две группы: 1 — (1, 2, 3) и 2 — (4, 5, 6). По этим группам строится волновая матрица передачи (опять при помощи формул (7)). По известным векторам прямых и обратных волн на входах первой группы определяются такие же векторы на входах второй группы. Неизвестными являются только компоненты векторов на входах 5 и 6, лежащих на поперечных сечениях полосковой линии; они и дают искомое поле в МАБ-представлении (восстановление уже известных из предыдущего компонент на входе 4 является элементом проверки алгоритма).

6. Аналогично строится система операций для следующего (стоящего левее) столбца МАБ, затем — следующего за ним и т. д. вплоть до левой стенки экрана, где должны быть воспроизведены нулевые значения тангенциальных компонент вектора напряженности электрического поля.

7. Все, описанное выше, повторяется в отношении правой части слоя.

Наконец, сделаем следующее замечание. Многократный пересчет векторов прямых и обратных волн при помощи волновых матриц передачи столбцов МАБ от границы рассеяния до стенки экрана чреват накоплением ошибки. При построении алгоритма принимались меры борьбы с этим явлением, а именно в описанном выше процессе несколько раз восстанавливается вектор c_{\perp}^{-} (если говорить о левой части слоя). При таком восстановлении используется матрица S'_{\perp} объединения остающихся столбцов МАБ. В реализованном алгоритме восстановление производилось за один слой до ребра полоскового проводника, на самом ребре и через один слой после ребра. Процесс в целом оставался устойчивым.

Перейдем к обсуждению конкретных примеров определения структуры полей полосковой линии. Ее поперечное сечение представлено на рис. 2. Разбиение на МАБ — неравномерное: выделены узкие вертикальные и горизонтальные слои МАБ с целью более мелкой дискретизации вблизи ребер. Рассматривалась линия на изотропной диэлектрической подложке, а также на ферритовой подложке при трех видах намагничивания — поперечном нормальном границе раздела сред, поперечном касательном и продольном. Во всех этих случаях было: $\epsilon_{\perp} = 9$; $\mu_{\perp} = 1$ (диагональная компонента тензора $\overset{\vee}{\mu}$), $\mu_{\parallel} = 1$ (продольная компонента $\overset{\vee}{\mu}$) и $\alpha = 0$; $\pm 0,4$; $\pm 0,6$ (недиагональная компонента $\overset{\vee}{\mu}$).

Ниже в таблицах представлены в условном масштабе поперечные поля — электрическое и магнитное. Даны вертикальная и горизонтальная компоненты вектора E (верхняя и нижняя строки в каждой клетке) и отвечающие им компоненты вектора H . Это усредненные значе-

ния напряженностей поля в прямоугольных областях, пронумерованных на рис. 2.

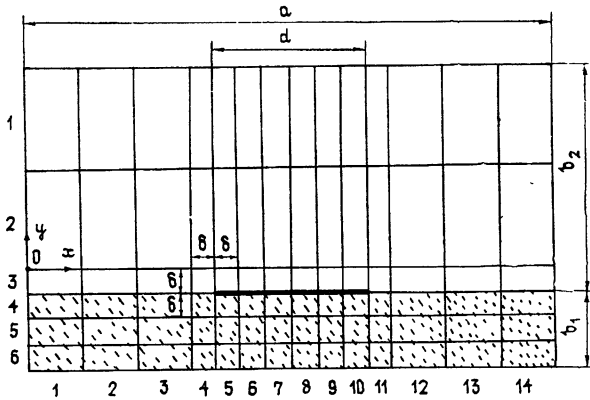


Рис. 2. К анализируемой конфигурации: $a=3,5$ мм, $d=1$ мм, $b_1=0,5$ мм, $b_2=1,5$ мм, $\delta=0,15$ мм (вне узких зон разбиение равномерно в подобластях); $\epsilon=9$, $f=20$ ГГц.

Таблица 1

Изотропный вариант ($\alpha=0$)

Поле E							Поле H						
5	5	4	4	3	1	0	-16	-13	-12	-11	-9	-4	-1
1	2	2	2	3	3	2	2	4	5	5	7	8	7
18	17	14	8	-1	-6	-2	-50	-51	-40	-29	4	10	4
2	8	17	23	19	8	3	7	24	39	47	41	25	17
30	39	65	26	-28	-19	-5	-79	-94	-175	24	38	26	8
1	6	16	101	34	8	1	2	12	128	180	81	29	17
-103	-107	-126	-82	-15	-5	-1	285	297	361	136	72	35	11
1	4	16	102	33	6	-3	3	10	124	174	75	27	14
-100	-99	-90	-68	-35	-10	-2	277	275	240	189	100	44	13
1	7	23	31	23	5	3	5	30	58	72	51	19	10
-97	-92	-81	-67	-40	-14	-3	268	253	225	184	115	50	14
1	4	7	9	7	2	0	3	10	17	21	15	7	3
8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14

(дана только правая половина поперечного сечения ввиду симметрии)

Таблица 2

Поперечное нормальное намагничивание ($\alpha=0,4$), E

0	2	4	5	5	6	7	6	6	5	4	1	0
-2	-2	-2	-1	-1	-1	0	2	4	3	3	5	4
-2	-4	1	9	15	18	20	21	22	18	11	-1	-3
-2	-6	-15	-18	-14	-5	0	5	12	25	32	28	13
-4	-14	-22	23	57	37	32	35	51	87	37	-36	-25
0	-5	-26	-83	-13	-5	0	3	9	22	138	49	14
-1	-4	-12	-69	-109	-99	-102	-110	-124	-158	-107	-19	-7
0	-4	-25	-84	-14	-3	-1	1	4	20	139	48	12
-2	-7	-29	-59	-80	-93	-100	-107	-114	-109	-86	-46	-13
0	4	-18	-25	-19	-6	-1	2	9	30	42	33	10
-2	-11	-33	-58	-73	-87	-97	-103	-104	-97	-82	-51	-19
0	-2	-6	-7	-6	-3	-1	1	0	9	12	11	4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14												14

Как видно, для этого вида гиротропии электрическое поле основной волны становится существенно несимметричным; под полоской оно близ-

ко к однородному вертикальному полю. Над подложкой вблизи экрана поле мало. Ясно выражены краевые всплески.

Таблица 3

Поперечное нормальное намагничивание ($\alpha = 0,4$), H

-1	-5	-11	-14	-15	-16	-18	-18	-15	-13	-12	-10	-3	-5	1
-5	-6	-5	-3	-2	0	2	6	8	9	9	11	12	10	
1	4	-2	-25	-41	-52	-54	-58	-63	-50	-27	10	17	7	2
-14	-20	-30	-35	-28	-14	2	18	39	59	70	61	38	24	
3	15	24	12	-150	-90	-84	-93	-120	-238	36	58	43	18	3
-16	-21	-61	-141	-101	-8	0	5	18	181	257	120	44	20	
2	21	51	101	323	274	286	311	355	473	186	106	57	25	4
-14	-19	-56	-137	-100	-9	-2	4	14	171	247	115	42	16	
2	27	74	154	208	256	279	302	325	302	251	145	72	31	5
-9	-14	-38	-56	-47	-24	-4	7	38	79	100	77	31	12	
2	31	86	154	196	237	270	291	295	277	240	163	81	35	6
-3	-5	-12	-17	-14	-9	-2	5	14	24	30	25	12	5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	

Как показывает сопоставление табл. 3 и табл. 1 (справа), поперечное нормальное намагничивание вызывает перераспределение магнитного поля такого же рода, как и поля электрического. Поскольку числа в таблицах можно рассматривать не только как усредненные в клетках значения компонент поля, но и как приближения к значениям этих компонент в средних точках клеток, то закономерно построение графиков. Примеры таких графиков, соответствующих третьему и четвертому рядам табл. 2 и 3, приведены ниже на рис. 3 и 4. Отчетливо проявляются всплески нормальных кромке металла компонент поля. Хотя линии, на которых графически представлено поле, лежат на некоторых расстояниях ($\pm \delta/2$) от границы раздела сред, кривые показывают непрерывность тангенциальных компонент вне полоскового проводника и указывают на разрывы компонент ϵE_y и H_x на проводнике.

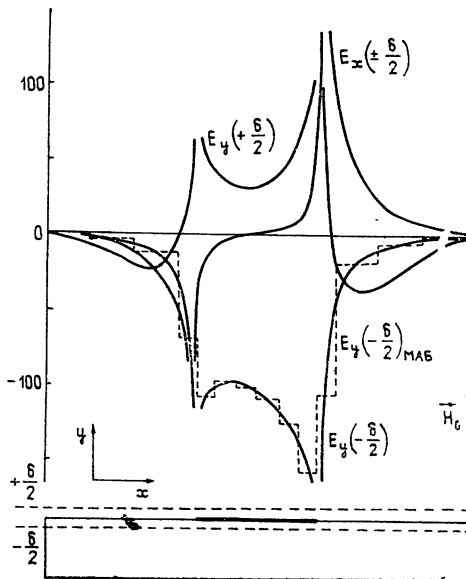


Рис. 3. Распределение электрического поля на уровнях $\pm \delta/2$ при нормальном намагничивании подложки ($H_0 = y_0 H_0$; $\mu = \mu_L = 1$, $\alpha = 0,4$).

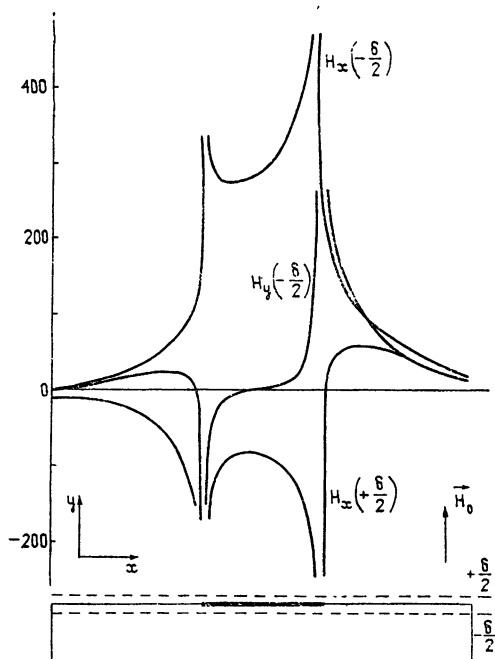


Рис. 4. Распределение магнитного поля на уровнях $\pm \delta/2$ при нормальном намагничивании подложки (см. рис. 3).

При касательном намагничивании подложки гиротропная деформация поля оказывается слабее. Покажем лишь фрагменты структуры поля вблизи границы раздела сред при $\alpha = \pm 0,6$.

Таблица 4

Поперечное касательное намагничивание ($\alpha = \pm 0,6$), E

36	47	75	33	-29	-20	-6	28	37	61	24	-26	-16	-5
2	7	18	114	41	12	3	1	6	15	95	32	8	2
-103	-108	-130	-87	-16	-6	-1	-103	-107	-124	-79	-14	-4	-1
1	4	17	113	39	9	2	1	4	16	97	31	6	1
8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14

Далее рассмотрим строение поля при продольном намагничивании подложки, также ограничиваясь фрагментом структуры.

Таблица 5

Продольное намагничивание ($\alpha = 0,6$), E

35,1 - i 0,39	45,1 - i 1,28	71,0 - i 2,38	32,4 - i 4,64
1,5 - i 2,71	6,2 - i 0,11	16,6 - i 0,16	102,8 + i 0,23
-102,6 - i 0,06	-107,6 - i 0,13	-127,9 + i 0,06	-85,5 + i 1,91
0,7 - i 1,38	3,6 - i 1,35	16,1 - i 1,14	103,2 - i 4,30
8	9	10	11

-22,9 - i 4,48	-15,2 - i 1,89	-4,4 - i 0,58
37,4 - i 3,18	12,2 - i 2,88	5,2 - i 2,39
-18,9 + i 2,18	-7,7 + i 0,74	-2,2 + i 0,24
36,0 - i 3,57	10,0 - i 2,95	4,0 - i 2,30
12	13	14

(в данном случае при построении таблицы было сохранено больше десятичных знаков, чтобы была заметна тонкая поляризационная структура). Легко видеть, что поле мало изменилось в сравнении со случаем изотропии (см. табл. 1).

В заключение для одного из рассмотренных выше случаев (поперечное нормальное намагничивание) приведем векторную диаграмму (рис. 5), имеющую такой же смысл, как картина силовых линий вектора \mathbf{E} . Стрелки совпадают по направлению со значениями \mathbf{E} в средних точках клеток (ср. рис. 2), а своей длиной указывают в некотором масштабе величину напряженности электрического поля. Диаграмма соответствует данным, помещенным в табл. 2.

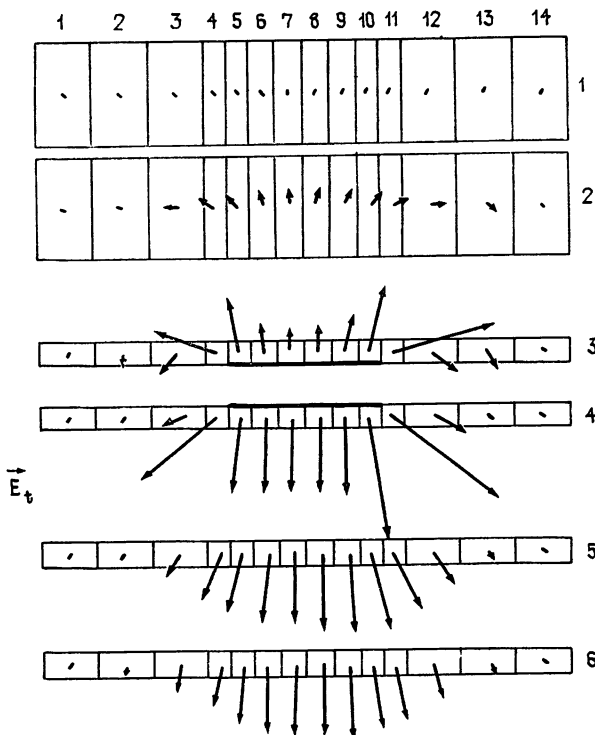


Рис. 5. Диаграмма электрического поля для случая нормального намагничивания подложки ($H_0 = y_0 H_0$); $\mu = \mu_L = 1$, $\alpha = 0,4$.

Заметим, наконец, что для всех приведенных выше численных данных (в таблицах, графиках и диаграмме) справедливо следующее правило размерностей: если напряженности электрического поля приписать размерность вольт на метр, то напряженность магнитного поля будет выражена в амперах на метр после деления соответствующих чисел на 120π .

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Никольский, Т. И. Лаврова, В кн. Машинное проектирование устройств и систем СВЧ, изд МИРЭА, М, 1978, с 31.

Московский институт радиотехники,
электроники и автоматики

Поступила в редакцию
10 апреля 1979 г.

DEFINITION OF FIELDS OF BAND LINES BY MAB METHOD

T. I. Lavrova, V. V. Nikol'skij

As a result of the development of the minimal autonomous block (MAB) method proposed by the authors an algorithm is created of the field definition of different guiding systems, in particular, strip lines. The basic aspect of investigation is the ferrite layer strip line with three types of magnetization generating a gyrotropical behaviour. Numerical results are given in the form of a table, diagrams, as well as vector diagram which show the field structure of the fundamental wave of the studied line.