

УДК 621.317.621.396.67(088.8)

АДАПТИВНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗА АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КВЧ ПОЛЯ В РАСКРЫВАХ ВОЛНОВЕДУЩИХ СТРУКТУР

Д. Н. Борисов, Б. И. Власов, Ю. Б. Нечаев

*Воронежский государственный университет
ФГУП «Воронежский НИИ Связи»*

Описаны алгоритм функционирования и технические характеристики комплекса, предназначенного для автоматизации экспериментальных исследований и стендовых испытаний волноведущих структур КВЧ. Перспективным для оперативной регистрации и обработки информации, заключенной в АФР полей КВЧ, является использование устройства с электронным возбуждением пассивного зонда-рассеивателя и реализация адаптивной процедуры формирования очищенных от мультипликативных и аддитивных аппаратурных искажений, присущих методу пассивного зондирования, массивов экспериментальных данных.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопросы излучения, распространения электромагнитных волн в волноведущих и излучающих структурах, моделирующие алгоритмы функционирования узлов аппаратуры, представляют фундаментальный и прикладной интерес в современной радиофизике и технике СВЧ—КВЧ.

Стремление использовать все более высокие пиковые уровни мощности приводит к необходимости проектирования узлов РЭС на основе сверхразмерных линий передач, а миниатюризация и массогабаритные ограничения ставят функционирование элементной базы в условия многомодового взаимодействия. Как следствие, декомпозиционный метод расчета электродинамических параметров (обобщенных матриц рассеяния СВЧ многополюсников) должен выполняться в результате решения соответствующих дифракционных задач при заданном многомодовом возбуждении. Поэтому существенное значение приобретают экспериментальные методы определения модовых спектров КВЧ полей в терминальных плоскостях сшивания волноведущих структур [1, 2], необходимых для оптимизации электродинамических характеристик РЭС на рабочей частоте и обес-

печения электромагнитной совместимости на частотах рабочих излучений, в которых применяются различные модификации зондовых измерений амплитудно-фазового распределения (АФР) поля [3—5].

2. АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСА

Схема устройства, иллюстрирующая способ регистрации пространственного АФР электромагнитного поля в раскрыве многоволнового волновода, представленная на рис. 1, содержит модулятор 1 электронно-лучевого сканера, зонд 2, экранную структуру 3, ко-

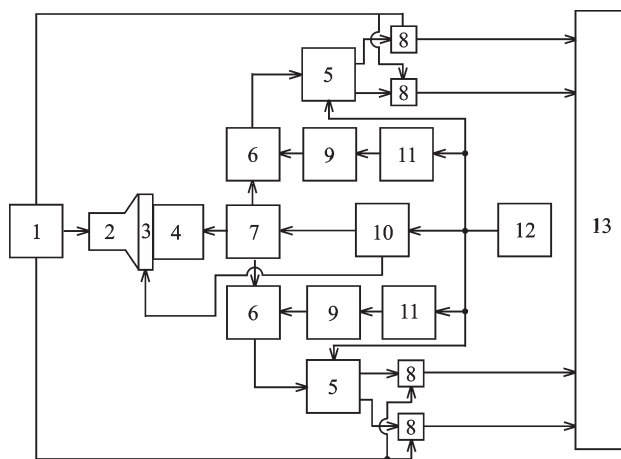


Рис. 1. Блок схема измерительного комплекса

торая содержит диэлектрический слой в виде планарного волновода, исследуемый многоволновый волновод 4, амплифазометры 5 трактов обработки ортогонально поляризованных сигналов, сумматоры 6, направленный поляризационный разделитель 7, синхронные детекторы 8, фазовращатели 9, волноводный переключатель 10, аттенюаторы 11, генератор 12 СВЧ и блок 13 регистрации (ЭВМ).

Устройство работает следующим образом. Волноводный переключатель 10 устанавливается в положение, обеспечивающее подключение выхода генератора 12 к входу исследуемого волновода 4 через основной тракт направленного поляризационного разделителя 7. Тем самым осуществляется возбуждение исследуемого многоволнового волновода 4, на раскрые которого формируется многомодовое АФР исследуемого поля, представленное разложением падающих и отраженных мод

$$\begin{aligned} \dot{\vec{E}}_{\tau}(x, y, z) &= \sum_{i=1}^N (\dot{d}_i^{(a)} + \dot{a}_i^{(a)}) \vec{e}_i = \\ &= \dot{E}_x(x, y, z) \vec{e}_x + \dot{E}_y(x, y, z) \vec{e}_y, \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{e}_i — поперечное электрическое поле i -й моды волновода 4; \vec{e}_x, \vec{e}_y — единичные орты осей поперечного сечения; $\dot{d}_i^{(a)}, \dot{a}_i^{(a)}$ — комплексные амплитуды i -й моды, распространяющейся в направлении $z, -z$ терминальной плоскости раскрыва; N — число распространяемых мод, ранжированных в порядке убывания критических длин волн.

Для отраженных мод $\mathbf{A}^{(v)}$ на входе амплифазометра 5, отнесенного к произвольной плоскости волновода возбуждения, можно получить

$$\mathbf{A}^{(v)} = [\mathbf{S}_{11} + \mathbf{S}_{12} \mathbf{G} \mathbf{S}_{11}^{(a)} (\mathbf{I} - \mathbf{G} \mathbf{S}_{22} \mathbf{G} \mathbf{S}_{11}^{(a)})^{-1} \mathbf{G} \mathbf{S}_{21}] \mathbf{D}^{(v)}, \quad (2)$$

а, для амплитуд падающих мод $\mathbf{D}^{(a)}$ в раскрые волновода 4 —

$$\mathbf{D}^{(a)} = [(\mathbf{I} - \mathbf{G} \mathbf{S}_{22} \mathbf{G} \mathbf{S}_{11}^{(a)})^{-1} \mathbf{G} \mathbf{S}_{21}] \mathbf{D}^{(v)}, \quad (3)$$

здесь $\mathbf{D}^{(v)}, \mathbf{A}^{(v)}$ — матрицы-столбцы мод полей возбуждения и отражения (обычно основная волна), $\mathbf{D}^{(a)}$ — матрица-столбец амплитуд падающих мод в раскрые волновода 4; $\mathbf{S}_{11}, \mathbf{S}_{12}, \mathbf{S}_{21}, \mathbf{S}_{22}$ — субматрицы неоднородности, возбуждающей модовый поток в волноводе 4, \mathbf{I} — единичная матрица, $\mathbf{S}_{11}^{(a)}$ — субматрица рассеяния раскрыва; L — длина регулярного волновода 4, характеристика которого представляется диагональной матрицей \mathbf{G} с эле-

ментами $G_i = e^{-\gamma_i L}$ ($\gamma_i = j\beta_i$ — постоянная распространения i -й моды из множества $\{1, \overline{N}\}$).

Квазисогласованность узла совмещения плоскостей раскрыва и экранной структуры 3 и выполнения электронно-лучевого сканирования зонда 2 обуславливают замену в выражениях (2, 3) $\mathbf{S}_{11}^{(a)}$ на текущие значения $\mathbf{S}_{11}^{(z)}(n)$ субматрицы рассеяния зонда, соответствующие n -му пространственному положению в раскрые с координатами $(x_0, y_0, 0)$.

В дипольном приближении на расстоянии L порядка нескольких длин волн от ориентированного вдоль оси y -ов короткого металлического диполя рассеянное поле в регулярном прямоугольном волноводе 4 сечением (a, b) можно представить конечным разложением [6] для y -й компоненты

$$(\dot{E}_{\text{рас}})_y = \sum_{i \in (m, n)} \dot{E}_{ymn} \sin\left(m \frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(n \frac{\pi y}{b}\right) e^{j\beta_{mn} L}, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{E}_{ymn} &= -j \frac{8\pi\eta}{ab\beta_{mn}} \sin\left(m \frac{\pi x_0}{a}\right) \times \\ &\times \cos\left(n \frac{\pi y_0}{b}\right) \left(k_{\xi_1 \mu_1}^2 - \frac{\pi^2 n^2}{b^2} \right) \dot{E}_y(x_0, y_0, 0), \end{aligned}$$

сменив ориентацию диполя на ортогональную, можно получить аналогичное выражение для x -й компоненты

$$(\dot{E}_{\text{рас}})_x = \sum_{i \in (m, n)} \dot{E}_{xmn} \cos\left(m \frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(n \frac{\pi y}{b}\right) e^{j\beta_{mn} L}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{E}_{xmn} &= -j \frac{8\pi\eta}{ab\beta_{mn}} \cos\left(m \frac{\pi x_0}{a}\right) \times \\ &\times \sin\left(n \frac{\pi y_0}{b}\right) \left(k_{\xi_1 \mu_1}^2 - \frac{\pi^2 m^2}{a^2} \right) \dot{E}_x(x_0, y_0, 0), \end{aligned}$$

здесь ξ_1, μ_1 — диэлектрическая и магнитная проницаемости заполняющей волновод среды, η — коэффициент, учитывающий электродинамические параметры рассеивателя (конфигурация, размеры, проницаемость) $\dot{E}_x(x_0, y_0, 0), \dot{E}_y(x_0, y_0, 0)$ — значения компонент в точке размещения зонда-рассеивателя.

Измерение осуществляется путем регистрации рассеянного зондом 2 поля назад в волновод 4. Обратный модовый поток возбуждает в основном волноводе на входе амплифазометра 5 обратную волну H_{10} , изменение комплексной амплитуды $\mathbf{A}^{(v)}$ которой

при сканировании, раскрыва формирует сигнал пассивного зондирования.

Используя (2) и (4, 5) можно получить зависимость, отражающую измерение комплексной амплитуды волны H_{10} на входе амплифазометра при сканировании зондом раскрыва волновода 4

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E_x(x_0, y_0) \\ E_y(x_0, y_0) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \dot{E}_x(x_0, y_0) \\ \dot{E}_y(x_0, y_0) \end{pmatrix} \times \\ \times \sum_{i \in (m, n)}^N \dot{S}_{1i}^{12} &\begin{bmatrix} \cos\left(m \frac{\pi x_0}{a}\right) \sin\left(n \frac{\pi y_0}{a}\right) \\ \sin\left(m \frac{\pi x_0}{a}\right) \cos\left(n \frac{\pi y_0}{a}\right) \end{bmatrix} \beta_{mn}^{-1} e^{j\beta_{mn}L} = \\ &= \begin{pmatrix} \dot{E}_x(x_0, y_0) \dot{Q}_x(x_0, y_0) \\ \dot{E}_y(x_0, y_0) \dot{Q}_y(x_0, y_0) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\dot{Q}_x(x_0, y_0)$, $\dot{Q}_y(x_0, y_0)$ — мультипликативное искажение, обусловленное пространственной особенностью возбуждения мод обратного потока и свойствами матрицы S , \dot{S}_{1i}^{12} — матричные элементы субматрицы S_{12} матрицы рассеяния неоднородности, генерирующей исследуемый многомодовый поток волновода 4.

Переотраженный зондом 2 поток, пройдя многоволновый волновод 4 в обратном направлении, поступает в направленный поляризационный разделитель 7. С выходов вспомогательных трактов направленного поляризационного разделителя 7 две ортогонально поляризационные компоненты анализируемого поля поступают на первые входы сумматоров 6. На вторые входы сумматоров 6 через фазовращатели 9 и аттенюаторы 11 подается опорный сигнал от генератора 12. Проводя соответствующую регулировку фазовращателя 9 и аттенюатора 11, компенсируем фоновую составляющую, возникающую из-за частичного рассогласования невозбужденной экранной структуры 3 и исследуемой неоднородности волновода 4. Таким образом, с выходов сумматоров 6 на сигнальные входы амплифазометров 5 поступают ортогонально-поляризованные компоненты анализируемого поля с скомпенсированными фоновыми составляющими по каждой из них. На опорные входы амплифазометров 5 от генератора 12 подается опорный сигнал, обеспечивающий получение на выходе амплифазометров 5 квадратурных компонент ортогонально-поляризационных

сигналов. Для эффективного выделения отраженного от зонда 2 сигнала производится модуляция его отражающей способности с помощью модулятора 1. Квадратурные сигналы с выходов амплифазометров 5 подаются на сигнальные входы синхронных детекторов 8. На опорные входы синхронных детекторов 8 подается выходное напряжение модулятора 1. С выходов синхронных детекторов 8 продетектированные квадратурные компоненты подаются в блок 13, где с их помощью регистрируется амплитуда и фаза ортогональных компонент исследуемого поля.

После этих измерений волноводный переключатель 10 переводится в положение, обеспечивающее подключение выхода генератора 12 к экранной структуре 3. Возбуждение волновода 4 не происходит. В экранной структуре 3 распространяется бегущая волна основного типа. Переизлучение в сторону раскрыва волновода 4 осуществляется с помощью зонда 2, выполняющего роль переизлучающей неоднородности. Вследствие того, что рассеивающий зонд (т.е. локальная область повышенной концентрации неравновесных носителей заряда в полупроводнике) имеет вид линейно поляризованного вибратора, поле, переизлученное в волновод 4, является линейно поляризованным. Изменяя взаимную ориентацию зонда 2 и раскрыва волновода 4 можно излучать ортогональные колебания. Линейно поляризованные волны, пройдя многоволновый волновод 4 в обратном направлении, разделяются по своим ортогональным составляющим в направленном поляризационном разделителе 7. Дальнейшая обработка аналогична режиму пассивного зондирования. Таким образом, в блоке 13 регистрируется характеристика обратного рассеяния для двух ортогональных поляризаций поля, переизлученного зондом обратно в волновод 4

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{E}_x^r(x_0, y_0) \\ \dot{E}_y^r(x_0, y_0) \end{pmatrix} &= \\ &= \begin{pmatrix} \dot{E}_{x0} \\ \dot{E}_{y0} \end{pmatrix} \sum_{i \in (m, n)}^N \dot{S}_{1i}^{12} \begin{bmatrix} \cos\left(m \frac{\pi x_0}{a}\right) \sin\left(n \frac{\pi y_0}{a}\right) \\ \sin\left(m \frac{\pi x_0}{a}\right) \cos\left(n \frac{\pi y_0}{a}\right) \end{bmatrix} \times \\ &\times \beta_{mn}^{-1} e^{j\beta_{mn}L} = \begin{pmatrix} \dot{E}_{x0} \dot{Q}_x(x_0, y_0) \\ \dot{E}_{y0} \dot{Q}_y(x_0, y_0) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

В блоке 13 осуществляется нормировка результатов измерений пассивного зондирования на результаты измерений с использованием излучающего зонда для исключения мультипликативных искажений, свойственных методу пассивного зондирования электродинамически замкнутых систем и обусловленных дифракционным преобразованием обратного модового потока в измерительный канал. Тем самым повышается точность и достоверность измерений исследуемого распределения поля в зоне раскрыва многомодового волновода.

Представленные на рис. 2 результаты квадратичного детектирования сигналов ак-

тивного (а), излучательного (б) и пассивного (в) режимов сканирования раскрыва с симметричным возбуждением показывает необходимость коррекции данных пассивного зондирования.

Иллюстрационный материал, используемый, например, в юстировочных целях, в виде аксонометрической и яркостной картин радиоизображения напряженности электрического поля моды H_{01} в раскрыве сверхразмерного круглого волновода диаметром $D = 40$ мм ($\lambda = 8,48$ мм) демонстрирует наличие существенных искажений в режиме пассивного зондирования (рис. 3 а, б), отражает особенности характеристики излучательного

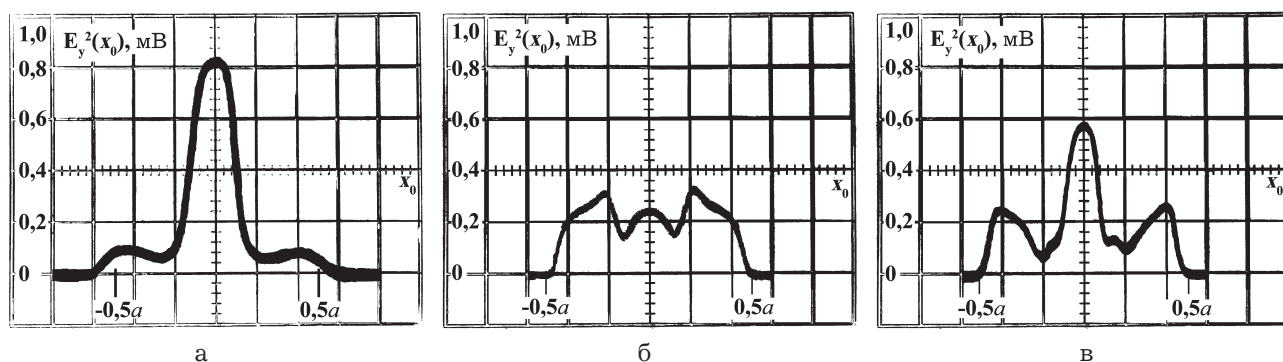


Рис. 2. Пространственная зависимость квадратичного детектирования: а — в режиме выделенной строки активного режима сканирования; б в режиме выделенной строки излучательного режима сканирования; в — в режиме выделенной строки пассивного режима сканирования

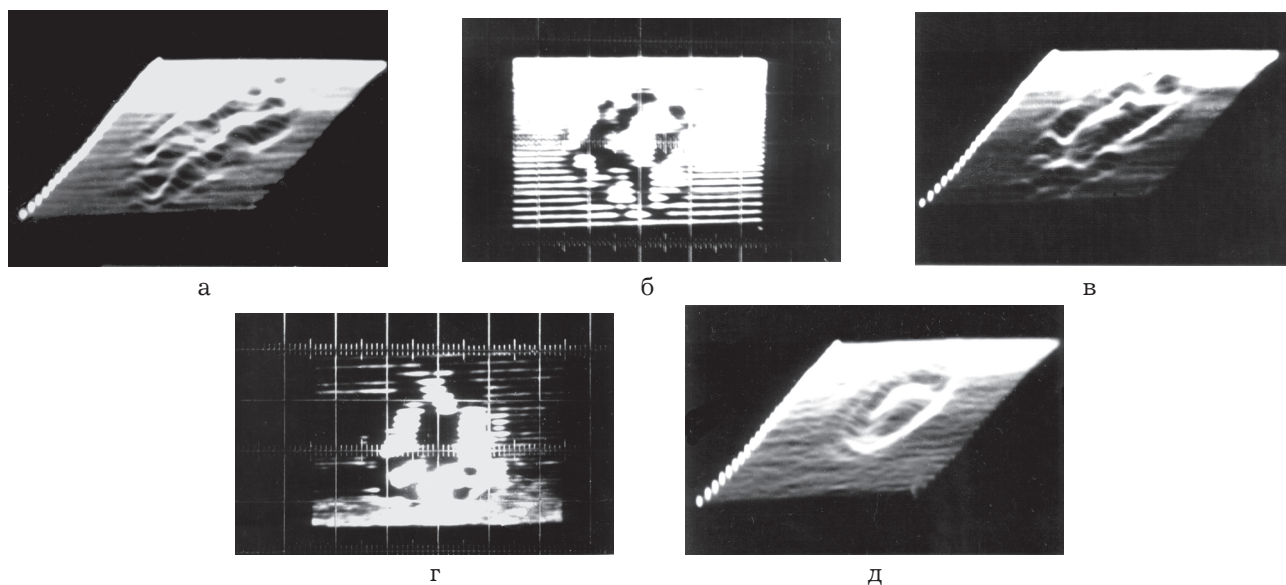


Рис. 3. Амплитудное распределение поля в раскрыве круглого волновода при пассивном режиме сканирования: а — аксонометрическое представление амплитудного распределения поля в раскрыве круглого волновода при излучательном режиме сканирования; б — яркостная картина; в — аксонометрическое представление амплитудного распределения поля в раскрыве круглого волновода при излучательном режиме сканирования; г — яркостная картина; д — аксонометрическое представление амплитудного распределения поля в раскрыве круглого волновода результата аналогово-цифровой нормировочной процедуры

зондирования (рис. 3 в, г) и результат аналого-цифровой нормировочной процедуры (рис. 3 д), эффективно снижающей мультипликативные аппаратные искажения.

На рис. 4 представлены очищенные от мультипликативных искажений осциллограммы пространственных зависимостей квадратурных сигналов последетекторной обработки

$$\begin{pmatrix} \text{Re} \\ \text{Im} \end{pmatrix} \dot{E}_y(x_0) = E_0 E_y(x_0) \begin{pmatrix} \cos \\ \sin \end{pmatrix} [\varphi(x) - \varphi_0], \quad (8)$$

а на рис. 5 — графики функций $E_y(x_0)/E_y^{\max}(x_0)$ (сплошная линия) и $\varphi(x_0)$ (пунктир)

$$E_y(x_0) = \sqrt{\text{Re}^2 [E_y(x_0)] + \text{Im}^2 [E_y(x_0)]},$$

$$\varphi(x_0) = \arctg \frac{\pm \text{Im} [E_y(x_0)]}{\pm \text{Re} [E_y(x_0)]}, \quad (9)$$

$$\varphi(x_0) \in (-\pi, \pi),$$

где $\varphi_0, E_0 \gg E_y(x_0)$ — регулируемые фаза и амплитуда когерентной опорной волны; $E_y(x_0), \varphi(x_0)$ — измеренные распределения амплитуды и фазы в раскрыве тестовой волноведущей структуры в виде скачкообразного перехода от волновода сечением $(7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2)$ на волновод сечением $(21,2 \times 3,4 \text{ мм}^2)$ с симметричным возбуждением мод H_{10}, H_{30} ($\lambda = 8,48 \text{ мм}$), из которых формируется дискретный массив экспериментальных данных для определения пространственного спектра потока распространяемых мод.

За рамками настоящей работы (часть 1) остается описание программного обеспечения комплекса, куда входят программы управления отдельными блоками, программы

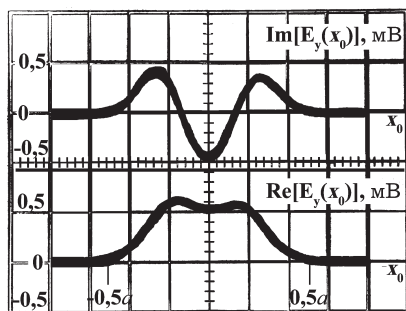


Рис. 4. Пространственные зависимости квадратурных сигналов формула (8)

опроса, записи и считывания массивов амплитудно-фазовых измерений, программа анализа модового спектра АФР полей волноведущих структур КВЧ.

Технические характеристики комплекса. Апертура анализа круг диаметром 100 мм; разрешающая способность не хуже 2 линий/мм; погрешность измерений амплитуды 5—7 %, фазы 9—11 %. Время опроса аналогового распределения, линейная скорость перемещения зонда, время перехода к следующему значению фазы опорного канала регулируется в широких пределах алгоритмами, определяемыми пользователями.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приводятся описания алгоритма функционирования и технические характеристики комплекса, предназначенного для автоматизации экспериментальных исследований и стендовых испытаний волноведущих структур КВЧ. Приведены экспериментальные результаты по оптимальному визуальному отображению АФР полей волноведущих структур миллиметрового диапазона. Перспективным для оперативной регистрации и обработки информации, заключенной в АФР полей КВЧ, является использование устройства с электронным возбуждением пассивного зонда-рассеивателя и реализация адаптивной процедуры формирования очищенных от мультипликативных и аддитивных аппаратных искажений, присущих

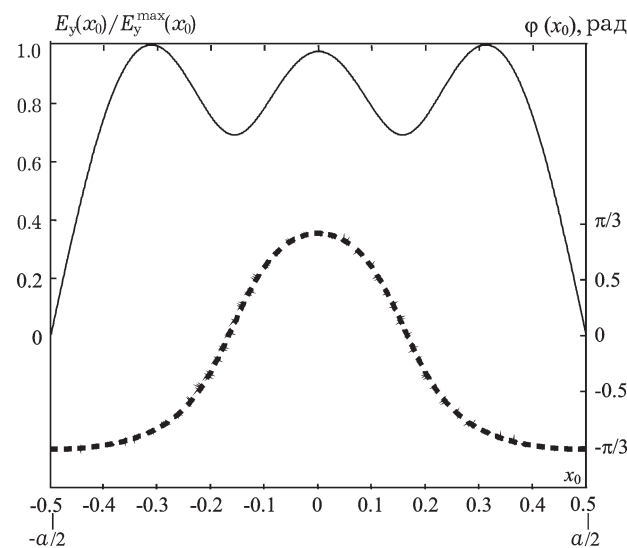


Рис. 5. Распределение амплитуды (сплошная линия) и фазы (пунктир) формула (9) в раскрыве тестовой волноведущей структуры

методу пассивного зондирования, массивов экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов Д.Н., Власов Б.И., Нечаев Ю.Б. Методика измерения модового спектра распространяющихся в волноведущей структуре типов колебаний // Электродинамика и техника СВЧ, КВЧ и оптических частот. — 2002. — Т. 10. — № 2 (34). — С. 163—168.

2. Борисов Д.Н., Власов Б.И., Золотухин А.В. Определение относительных парциальных уровней многомодового потока мощности по дискретным отсчетам в апертуре КВЧ тракта // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2003. — Т. 6. — № 2. — С. 34—38.

3. Брандт Э.А., Власов Б.И., Обтемперанский Ю.С., Чайковский В.Е. Устройство для измерения амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля в зоне раскрыва много-

модового тракта / А.С. № 1469473, Б.И. № 12, 1989.

4. Власов Б.И., Обтемперанский Ю.С., Шарков В.М., Шульженко С.Н. Способ регистрации пространственного распределения электромагнитного поля в раскрыве многоволнового волновода / А.С. № 1597786, Б.И. № 37, 1990.

5. Власов Б.И., Обтемперанский Ю.С., Чайковский В.Е., Шульженко С.Н. Автоматизированный комплекс для оперативной регистрации и анализа пространственного амплитудно-фазового распределения электромагнитных полей миллиметрового диапазона // ПТЭ. (Приборы и техника эксперимента) — 1990. — № 3. — С. 226.

6. Петленко В.А., Хижняк Н.А. Рассеяние электромагнитных волн идеально проводящими телами в прямоугольном волноводе // Радиотехника и электроника. — 1978. — Т. 21. — № 9. — С. 1325—1331.