

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.396.967

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ ПОЛЕЙ НА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ МАТРИЧНОГО ТИПА С КОЛЬЦЕВЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ

© 2021 г. Е. С. Емельянов*

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
“Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина”,
ул. Старых Большевиков, 54 а, Воронеж, 394064 Российская Федерация*

**E-mail: cap_emela@mail.ru*

Поступила в редакцию 18.08.2020 г.

После доработки 18.09.2020 г.

Принята к публикации 25.11.2020 г.

Получены закономерности формирования плоского поля в зависимости от размера рабочей зоны и количества тестирующих воздействий. Установлено, что для заданных размеров рабочей зоны может быть определено пороговое значение минимально необходимого количества элементов эквидистантных кольцевых антенных решеток, позволяющих формировать в рабочей зоне плоское поле.

DOI: 10.31857/S0033849421050053

В настоящее время одним из наиболее информативных методов измерения радиолокационных характеристик (РЛХ) объектов является матричный метод. При матричном методе измерений объект рассматривается как линейная система, преобразующая воздействие в виде падающей электромагнитной волны (ЭМВ) в отклик в виде рассеянной ЭМВ. Суть матричного метода заключается в определении по экспериментальным данным передаточной функции объекта — математического оператора, описывающего объект как линейную систему. Переходя к терминологии линейной алгебры, можно сказать, что данный математический оператор действует из подпространства, представляющего собой множество полей облучения, в подпространство рассеянных полей. С позиции оценки радиолокационной заметности наибольший интерес представляет реакция объекта на воздействие в виде плоской ЭМВ, позволяющая оценить такую важную в радиолокации характеристику объекта, как эффективная поверхность рассеяния (ЭПР). В то же время формирование тестирующих воздействий в виде плоских ЭМВ сопряжено с определенными практическими трудностями, связанными с обеспечением протяженных измерительных трасс (измерения в дальней зоне) или с использованием коллиматоров, обеспечивающих плоское поле облучения на небольших расстояниях.

Преимущество матричного метода при проведении измерений ЭПР на радиолокационных комплексах состоит в том, что реакция объекта на воздействие в виде плоской ЭМВ может быть рас-

считана на основе линейной комбинации откликов объекта на совокупность “простых”¹ тестирующих воздействий в виде ЭМВ с известными параметрами, чаще всего со сферическим волновым фронтом [1–3]. Такой подход применяется как альтернатива линзовым и зеркальным коллиматорам при формировании плоского поля в условиях полигонов ограниченных размеров [4–7]. Одна из интерпретаций алгоритмов обработки, используемых при матричном методе измерений, заключается в том, что плоское поле облучения в рабочей зоне комплекса формируется “виртуально” (на этапе обработки) и представляет собой суперпозицию “простых” тестирующих воздействий. Основными требованиями к тестирующим воздействиям являются ортогональность и полнота в смысле возможности формирования требуемых плоских полей облучения с заданной погрешностью. В реальных условиях ортогональность тестирующих воздействий может быть обеспечена с определенной погрешностью. При этом в зависимости от требуемой погрешности измерения ЭПР, связанной с точностью “виртуального” формирования плоского поля облучения, может меняться и количество тестирующих воздействий.

Минимизация количества тестирующих воздействий позволит сократить время проведения измерений матричным методом. Однако обоснование количества и вида тестирующих воздействий при решении задачи измерений ЭПР объ-

¹ “Простых” в смысле практической реализации и требуемых аппаратных и материальных средств.

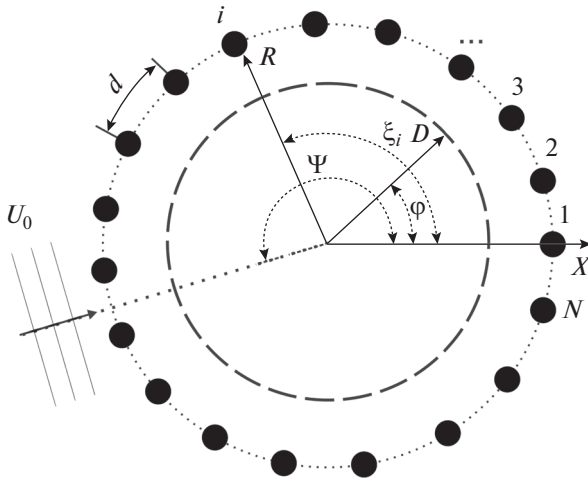


Рис. 1. Модель радиолокационного комплекса матричного типа, 1, 2, 3, ..., i, ..., N — порядковый номер элемента антенной решетки.

ектов матричным методом до настоящего времени не проводилось.

Целью данной работы является исследование закономерностей формирования плоских полей на радиолокационных комплексах матричного типа с кольцевыми антенными решетками (АР) и оценка требуемого количества тестирующих воздействий, необходимых для измерения ЭПР объектов матричным методом.

При измерении ЭПР объектов необходимо формирование плоского поля облучения в рабочей зоне. Поэтому рассмотрим задачу формиро-

вания плоского поля, падающего под фиксированным углом Ψ , на примере двумерной модели радиолокационного измерительного комплекса (РИК) матричного типа. В качестве модели рассмотрим круговую АР (рис. 1) с радиусом R , состоящую из N изотропных антенных элементов, расположенных на расстоянии $d = 0.5\lambda$ друг от друга (λ — рабочая длина волны). Введем цилиндрическую систему координат с началом, совпадающим с центром круговой АР. Каждый изотропный элемент решетки формирует в рабочей зоне РИК тестирующую волну со сферическим волновым фронтом (далее такие волны будем называть сферическими, несмотря на то что рассматриваем двумерную задачу). Зададим набор требуемых полей, “виртуально” формируемых в рабочей зоне РИК. Исходя из рассматриваемой задачи — измерения ЭПР, будем считать, что требуемыми являются поля с плоским волновым фронтом (далее — плоские поля). При этом рассматриваем круговую рабочую зону РИК² при условии $D < R$.

Принцип апостериорного (“виртуального”) формирования требуемого поля облучения при матричном методе измерения заключается в следующем. На поверхности, ограничивающей рабочий объем, рассчитываются комплексные амплитуды полей $v_i(\varphi, D)$, $i = 1, \dots, N$, формируемых элементами АР. Затем задаются комплексные амплитуды требуемого плоского поля облучения $U_0(\varphi, D|\Psi)$, падающего на объект с направления Ψ . Далее производится расчет весовых коэффициентов $\hat{\alpha}_{i0}(D, \Psi)$ на основе минимизации функционала вида [2, 3, 6, 8]

$$\alpha_{i0}(D, \Psi) = \arg \min_{\alpha} \left\{ \left| \sum_{i=1}^N \hat{\alpha}_{i0}(D, \Psi) v_i(\varphi, D) - U_0(\varphi, D|\Psi) \right|^2 < \varepsilon \right\}, \quad (1)$$

где D — радиус рабочей зоны, Ψ — направление падения требуемого поля облучения; φ — угловая координата границы рабочей зоны; N — количество элементов АР; U_0 — требуемое плоское поле облучения; v_i — поле облучения, формируемое элементом АР с номером i ; ε — требуемая точность формирования поля, α_{i0} — искомые минимальные значения весовых коэффициентов.

Введем в рассмотрение векторы $\mathbf{V}_0 = (v_1, v_2, v_i, \dots, v_N)^T$ и диагональную матрицу $\mathbf{A}$ с диагональными элементами α_{i0} , где $(\cdot)^T$ обозначает операцию транспонирования. Значения апостериорно формируемого (“виртуального”) поля

$u_0(\varphi, D)$ облучения³ на поверхности, ограничивающей рабочий объем РИК, можно записать в виде:

$$u_0 = \sum_{i=1}^N \alpha_i(D, \Psi) v_i(\varphi, D). \quad (2)$$

На основе выражения (2) запишем матричное уравнение для расчета комплексных амплитуд u_i полей, формируемых элементами АР:

$$\mathbf{U}_0 = \begin{pmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \alpha_N \end{pmatrix}^* \begin{pmatrix} v_1 \\ \dots \\ v_N \end{pmatrix} = \mathbf{A}^* \mathbf{V}_0. \quad (3)$$

² Круговая рабочая зона обеспечивает наилучшее согласование с формой объекта при изменении ракурса зондирования.

³ Уточним, что для оценки ЭПР объекта необходимо дополнительно провести виртуальное формирование плоского “поля приема” [2]. Эта процедура аналогична алгоритму формирования поля облучения, поэтому в работе не рассматривается.

Матрица $\mathbf{A}$ описывает линейный оператор преобразования вектора $\mathbf{V}_0$, который характеризует тестирующие поля, формируемые элементами антенной системы в рабочей зоне РИК, в вектор $\mathbf{U}_0$. Зададим пространство полей $\mathbf{S}$, формируемых РИК. Данное пространство ограничено тестирующими полями, формируемыми отдельными элементами антенной системы и одним плоским полем, падающим под углом Ψ .

Матрица $\mathbf{A}$ описывает оператор простой структуры, так как является диагональной [9]. Оператор характеризуется собственными векторами $\mathbf{V}_1 = (v_1, 0, \dots, 0)^T$; $\mathbf{V}_2 = (0, v_2, 0, \dots, 0)^T$; ...; $\mathbf{V}_N = (0, \dots, 0, v_N)^T$ и соответствующими им собственными значениями α_i . Совокупность векторов $\mathbf{V}_N$ образует базис в пространстве $\mathbf{S}$, т.е. описывает набор тестирующих воздействий, позволяющих сформировать “виртуальное” плоское поле в рабочей зоне. Векторы $\mathbf{V}_N$ образуют подпространство $\mathbf{S}_0$. Вектор $\mathbf{U}_1 = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ образует подпространство требуемых плоских полей $\mathbf{S}_U$. В данном случае подпространство $\mathbf{S}_U$ состоит только из одного элемента — плоского поля, падающего под углом Ψ .

Действие оператора простой структуры всегда сводится к “растяжению” координат вектора в базисе, состоящем из собственных векторов [4], что в рассматриваемой задаче эквивалентно изменению амплитуды и фазы поля, излучаемого элементом антенной системы:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{V}_i = \alpha_i \mathbf{V}_i.$$

Модуль собственных значений α_i характеризует весовой вклад каждого из базисных векторов. Если вклад собственного вектора в формируемое поле мал в сравнении с вкладом других векторов (критерий малости необходимо установить дополнительно), то данный базисный вектор можно исключить, тем самым уменьшив количество тестирующих воздействий, и устранить избыточность первичных результатов измерений.

Таким образом, если преобразование из подпространства тестирующих полей в подпространство формируемых полей описывается оператором простой структуры и известны собственные векторы и собственные числа этого оператора, то модуль собственного значения характеризует вклад каждого тестирующего воздействия в апостериорно формируемое поле облучения. При заданных требованиях к погрешности формирования поля облучения возможно ограничить количество тестирующих воздействий путем исключения собственных векторов, которым соответствуют собственные числа, удовлетворяющие неравенству $\alpha_i < \gamma$ (γ — пороговое значение, рассчитываемое для конкретной задачи и набора тестирующих воздействий).

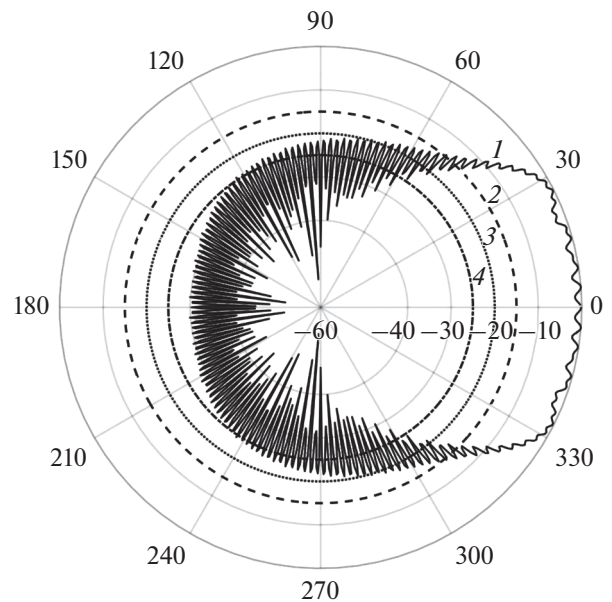


Рис. 2. Результаты численного расчета коэффициентов α_i в зависимости от их углового положения: 1 — рассчитанные значения модуля коэффициентов α_i при формировании “виртуального” плоского поля падающего под углом $\Psi = 0$, $N = 720$, $R = 20\lambda$, $D = 10\lambda$; пороговые значения $\gamma = -15$ дБ (2), -20 дБ (3) и -25 дБ (4).

На рис. 2 представлены зависимости модулей коэффициентов α_i от углового положения антенного элемента при формировании “виртуального” плоского поля, падающего под углом $\Psi = 0$. Расчет проведен при следующих параметрах модели РИК: количество элементов эквидистантной антенной системы $N = 720$, радиус антенной системы $R = 20\lambda$, радиус рабочей зоны РИК $D = 10\lambda$. Из закономерности распределения модуля собственных чисел видно, что основной вклад в формируемое поле вносят элементы антенной системы, находящиеся в 60-градусном секторе относительно направления падения “виртуального” плоского поля. Геометрическая проекция этой части антенной системы по направлению падения формируемой плоской волны перекрывает заданную рабочую зону РИК.

На рис. 3 представлены качественные картины поля, формируемого в рабочей зоне, для случаев полного ($N = 720$) и ограниченного количества тестирующих воздействий.

Анализ представленных на рис. 3 результатов показывает, что ограничение количества тестирующих полей в соответствии с их вкладом при апостериорном формировании плоского поля облучения приводит к увеличению погрешности формирования “виртуального” плоского поля в рабочей зоне.

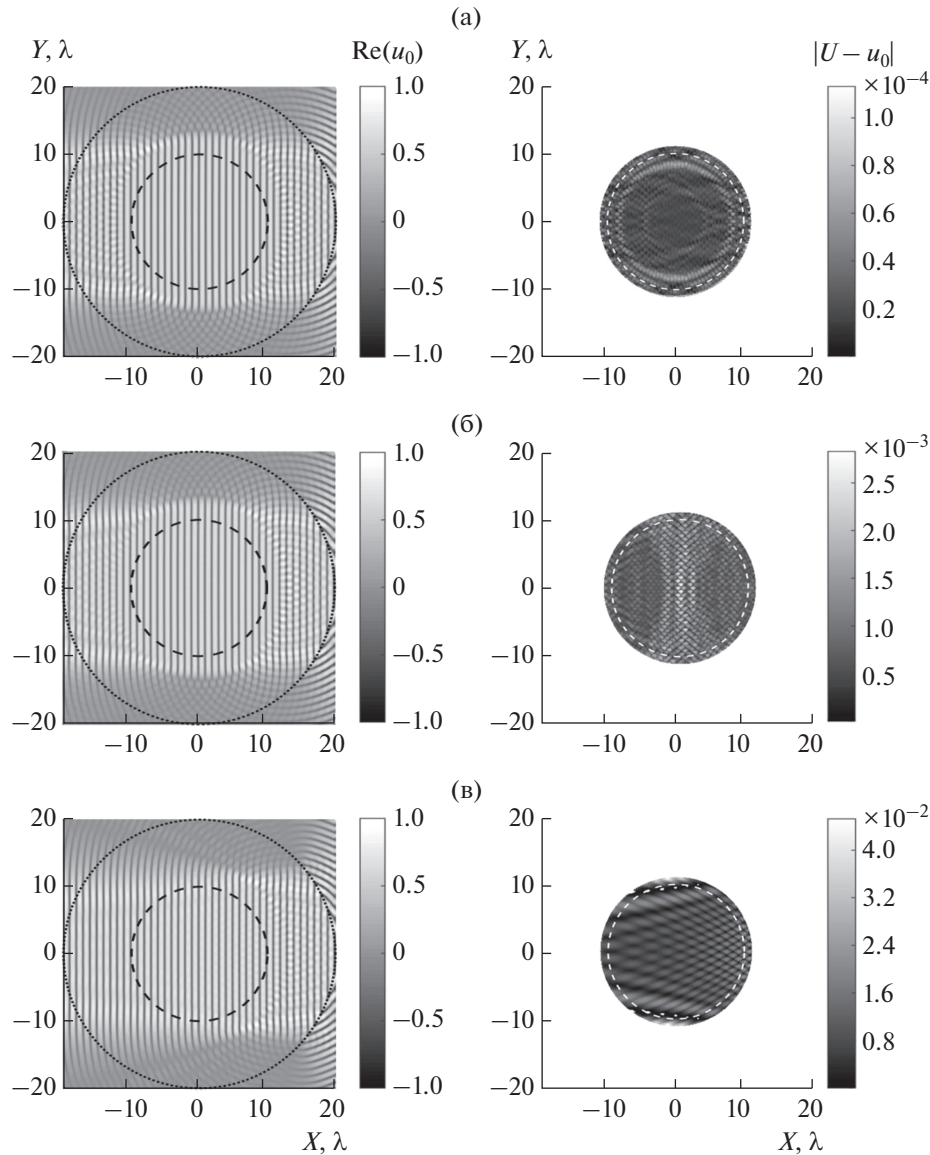


Рис. 3. Качественные картины полей (левая колонка), формируемых в рабочей зоне, для случаев полного количества тестирующих воздействий (а) и ограниченного с порогом $\gamma = -25$ дБ (б) и -10 дБ (в) и соответствующие погрешности формируемых полей (правая колонка).

РИК. В то же время погрешность формирования плоского поля не превышает единиц процентов.

Следует отметить, что отклонение обусловлено не только ограничением количества элементов линейной комбинации тестирующих полей в выражении (2). Коэффициенты α_i рассчитывались для случая полной совокупности тестирующих воздействий, и в случае введенных ограничений они не являются оптимальными по критерию наименьшего среднеквадратического отклонения.

Рассмотрим общий случай — измерение круговой диаграммы ЭПР. В этом случае требуется формирование совокупности плоских полей, падающих под различными углами Ψ_m , ($m = 1, \dots, M$),

M — количество угловых отсчетов (для упрощения будем считать, что $M = N$). Введем шаг и диапазон изменения углов $\Psi_{\min} \dots \Psi_{\max}$. Обозначим $\Psi_1 = \Psi_{\min}$, $\Psi_M = \Psi_{\max}$, $\Psi_m = \Psi_1 + m\Delta\Psi$, а вектора весовых коэффициентов перепишем в виде $\mathbf{A}_m = \mathbf{A}(\Psi_m) = (\alpha_{1m}, \alpha_{2m}, \dots, \alpha_{Nm})^T$. Значения апостериорно формируемого (“виртуального”) поля $u_m(\varphi, D, \Psi_m)$ облучения на поверхности, ограничивающей рабочий объем РИК, можно записать как

$$u_m(\varphi, D, \Psi_m) = \sum_{i=1}^N \alpha_{im}(D, \Psi_m) * v_i(\varphi, D).$$

На основе выражения для полей u_m запишем матричное уравнение для расчета комплекс-

ных амплитуд u_{nm} полей, формируемых элементами АР:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} u_{11} & \dots & u_{N1} \\ \dots & \dots & \dots \\ u_{1M} & \dots & u_{NM} \end{pmatrix} = \mathbf{A}^* \cdot \mathbf{V} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \dots & \alpha_{N1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{1M} & \dots & \alpha_{NM} \end{pmatrix}^* \begin{pmatrix} v_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & v_N \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Строки матрицы $\mathbf{U}$ образуют подпространство векторов $(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_m)^T$, каждый из которых характеризует “виртуально” формируемое плоское поле в рабочей зоне, падающее под заданным углом. Матрица $\mathbf{A}$ в (4) описывает линейный оператор преобразования из подпространства тестирующих полей (сферических волн) в подпространство формируемых полей (плоских волн). В отличие от оператора $\mathbf{A}$, описываемого выражением (3), в выражении (4) матрица $\mathbf{A}$ не диагональная, а значит, не соответствует оператору простой структуры [4]. Следовательно, базисные векторы $\mathbf{V}_1 = (v_1, 0, \dots, 0)^T$; $\mathbf{V}_2 = (0, v_2, 0, \dots, 0)^T$; ...; $\mathbf{V}_N = (0, \dots, 0, v_N)^T$ не являются собственными векторами этого оператора.

Если провести декомпозицию задачи и рассматривать “виртуальное” плоское поле в рабочей зоне отдельно для каждого угла падения, то будут справедливы ранее сделанные выводы о возможности порогового ограничения количества тестирующих воздействий. В то же время ограничить общее количество тестирующих воздействий при попытке решения задачи “в лоб” затруднительно, что наглядно видно из рис. 1. Действительно, при изменении угла падения плоского поля соответствующим образом будут изменяться и собственные значения векторов, характеризующих тестирующие воздействия, т.е. собственные значения векторов в выражении (2) отличаются для различных углов облучения рабочей зоны. В итоге для обеспечения облучения объекта плоскими полями в заданном секторе углов потребуется использование всех тестирующих воздействий. Ограничения для одного выбранного направления будут не соответствовать пороговым значениям для других направлений.

Рассмотрим другое решение данной задачи. Известно, что каждому линейному оператору в заданном пространстве соответствует множество его матриц, определяемое возможностью выбора различных базисов. В нашем случае базис — это совокупность тестирующих полей. Под пространством $\mathbf{S}$, в котором определен этот базис, будем понимать совокупность полей, которые могут быть “виртуально” получены в виде суперпозиции тестирующих полей. При этом, как и раньше, введем два подпространства: подпространство

тестирующих полей $\mathbf{S}_0$ и подпространство требуемых “виртуально” формируемых плоских полей $\mathbf{S}_U$, падающих под различными углами Ψ_m .

Попробуем найти такие тестирующие поля, которые образуют базис в пространстве полей $\mathbf{S}$. Причем будем искать такой базис, в котором оператор $\mathbf{A}$, описывающий преобразование из $\mathbf{S}_0$ в $\mathbf{S}_U$, является оператором простой структуры и имеет диагональный вид.

Для решения данной задачи необходимо найти собственные векторы оператора $\mathbf{A}$. Алгоритмы численного решения данной задачи хорошо отработаны [10]. Для рассматриваемой модели РИК и заданных размеров рабочей зоны с использованием численного расчета получены собственные векторы $(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_N)$ оператора $\mathbf{A}$. Каждый из этих векторов определяет распределение поля в рабочей зоне РИК. На рис. 4 представлены качественные картины этих полей.

Анализ полученных результатов показал, что собственные векторы оператора преобразования сферических волн (тестирующих полей) в совокупность плоских полей представляют собой собственные моды цилиндрического волновода (резонатора), что соответствует модели рассматриваемого РИК матричного типа. Фактически рассматриваемая модель РИК представляет собой сечение цилиндрического волновода (резонатора). Моды цилиндрического волновода рассчитываются на основе решения уравнений мембраны, которое в цилиндрической системе координат имеет вид [11]

$$\begin{aligned} \psi_{\sin} &= \dot{A} J_m(kr) \sin(m\theta), \\ \psi_{\cos} &= \dot{A} J_m(kr) \cos(m\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

где, J_m — функция Бесселя первого рода порядка m , r — радиус вектор, θ — полярный угол, k — волновое число. Данное уравнение имеет два независимых решения, одно из которых характеризуется синусоидальной, а другое косинусоидальной зависимостью от полярного угла, т.е. для каждого порядка m существует два типа волн. Рассчитанные согласно выражениям, приведенным в [11], поля различных мод (для E типа волн) и поля, соответствующие собственным векторам оператора $\mathbf{A}$ представлены на рис. 4.

Физическая интерпретация данных результатов в рамках решения задачи измерения радиолокационных характеристик объектов может быть следующей. В рабочей зоне РИК формируются мультифокусные поля, происходит мультифокусировка антенной системы РИК. Причем формируемые поля можно упорядочить таким образом, что фокусировка полей происходит на различных радиусах начиная от центра рабочей зоны (см. рис. 4а) к краю (см. рис. 4г). Кроме того, собственные векторы также определяют два типа полей с ко-

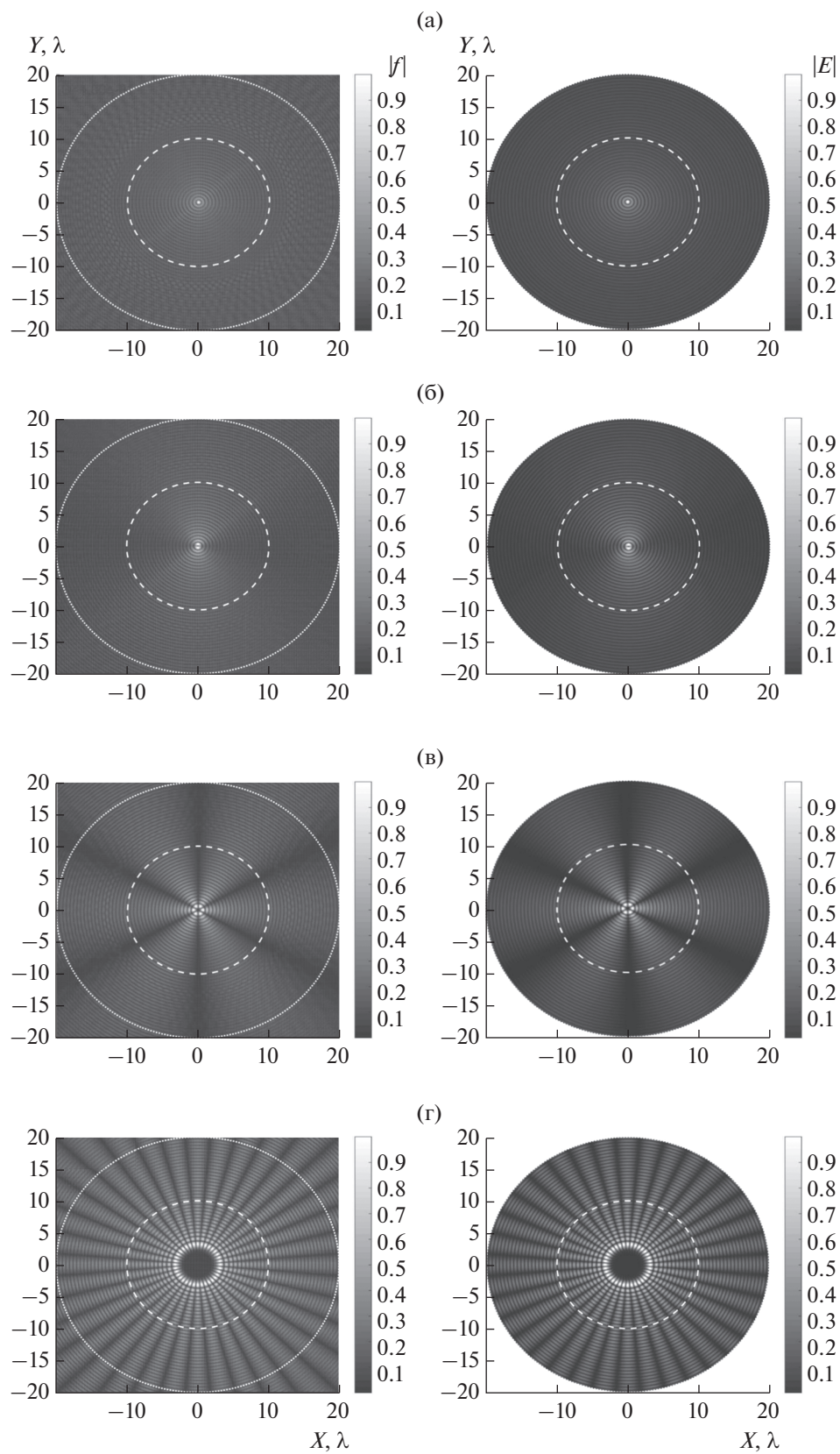


Рис. 4. Поля, формируемые собственными векторами (левая колонка), и соответствующие им моды цилиндрического резонатора (правая колонка), (а) первая мода, (б) вторая мода, (в) третья мода, (г) тридцать шестая мода.

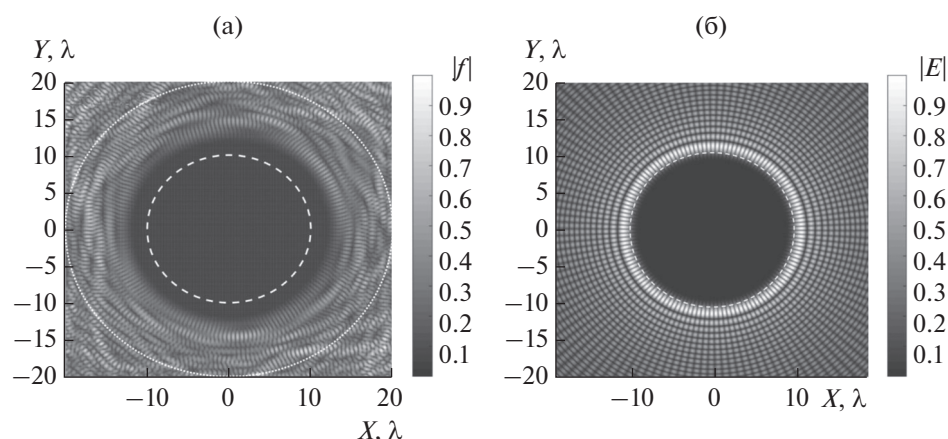


Рис. 5. Качественная картина поля для случая, когда радиус мультифокусировки превышает радиус требуемой рабочей зоны, (а) картина поля соответствующая собственному вектору, (б) картина поля соответствующая моде цилиндрического резонатора.

синусоидальной и синусоидальной зависимостью от полярного угла. Каждому мультифокусному полю соответствует мода поля цилиндрического резонатора. Индекс моды связан с радиусом, на котором расположены фокусы поля:

$$r = m\lambda/2\pi. \quad (6)$$

Так, для $m = 0$ фокусировка происходит в центре антенной системы (поле имеет один фокус), для $m = 18$ происходит мультифокусировка (количество фокусов 36) на окружности с радиусом $r = 2.86\lambda$, для $m = 68$ (количество фокусов 136) — $r = 10.825\lambda$.

Поля, соответствующие собственным функциям, для которых фокусы формируются вне рабочей зоны РИК, обладают отличительным свойством, заключающемся в “отсутствии”⁴ поля в рабочей зоне. Качественная картина таких полей представлена на рис. 5.

Таким образом, пространственная структура мультифокусных полей соответствует структуре полей собственных мод резонаторов, геометрия которых совпадает с формой антенной системы измерительного комплекса. При этом порядок моды характеризует пространственное положение мультифокусов каждого из полей. Для случая цилиндрической АР пространственное положение фокусов характеризуется радиусом, на котором происходит мультифокусировка. Ряд полей имеет пространственную структуру, при которой поле в рабочей зоне “отсутствует” — амплитуда поля в рабочей зоне минимальна.

Фактически мы перешли от тестирующих воздействий в виде сферических полей к тестирующим воздействиям двух типов в виде полей — собствен-

ных мод цилиндрического резонатора и полей, амплитуда которых стремится к нулю в рабочей зоне.

Мультифокусная структура этих полей-мод позволяет предъявить физически обоснованные требования к минимально необходимому количеству тестирующих воздействий для измерения ЭПР объекта при заданных размерах рабочей зоны РИК. Эти требования заключаются в том, что необходимо обеспечить мультифокусное сканирование рабочей зоны, т.е. создать такие поля, которые “заполнят” максимумами пространство рабочей зоны.

Например учитывая, что радиус рабочей зоны равен $D = 10\lambda$, а для $m = 68$ радиус мультифокусировки равен $r \approx 10.825\lambda$, с учетом уравнения⁵ (5) приходим к выводу, что для измерения ЭПР объекта необходимо 132 тестирующих воздействия. Сопоставим полученные цифры с результатами численного расчета собственных векторов оператора A .

Каждому собственному вектору соответствует собственное число. Модуль собственного числа характеризует величину вклада собственного вектора (тестирующего воздействия) в формируемое “виртуальное” плоское поле. На рис. 6 представлены зависимости модуля собственных значений собственных векторов оператора A для различных размеров рабочей зоны РИК при разных размерах антенной системы.

Из графиков рис. 6 видно, что собственные значения можно разделить на две группы — “значимые” и “близкие к нулю”, — отделенные друг от друга пороговым изменением модуля. Для размера антенных систем $R = 30\lambda, 40\lambda, 60\lambda$ получены прак-

⁴ Под “отсутствием поля” понимается существенное уменьшение амплитуды.

⁵ Необходимо формировать поля для косинусоидальной и синусоидальной составляющих, т.е. в два раза больше чем m .

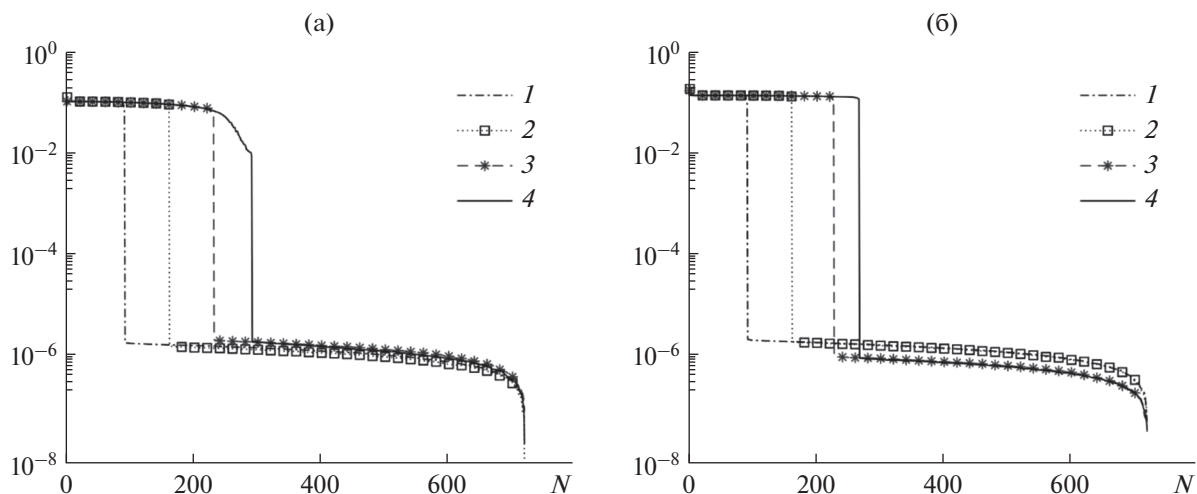


Рис. 6. Зависимости модуля собственных значений собственных векторов оператора A от порядкового номера собственного вектора для антенной решетки с радиусом $R = 20\lambda$ (а) и $R = 30\lambda, 40\lambda, 60\lambda$ (б) при размере рабочей зоны $D = 5\lambda$ (1), 10λ (2), 15λ (3) и 18λ (4).

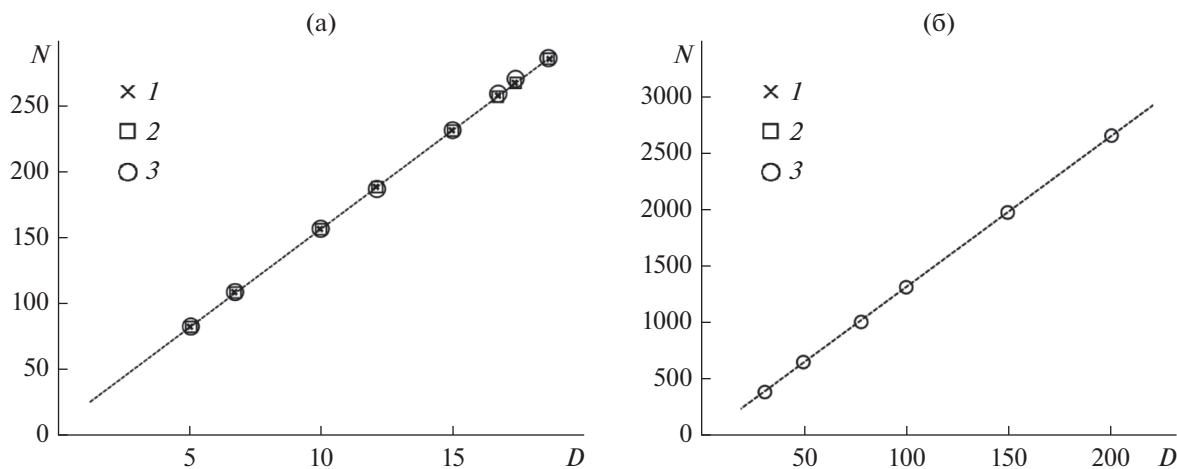


Рис. 7. Количество тестирующих воздействий N , определенных по пороговым значениям собственных чисел, для формирования плоского поля в рабочей зоне $D < 20\lambda$ (а) для различных размеров антенной решетки: $R = 20\lambda$ (1), 40λ (2), 300λ (3) (а), и для $20\lambda < D < 200\lambda$ (б).

тически одинаковые зависимости и, что важно, — одинаковое пороговое значение.

При сопоставлении собственных значений и собственных векторов установлено, что полям, радиус мультифокусировки которых превышает радиус рабочей зоны, соответствуют собственные значения “близкие к нулю”. А полям, радиус мультифокусировки которых меньше радиуса рабочей зоны, соответствуют “значимые” собственные значения. Таким образом, пороговое значение, разделяющее “значимые” и “близкие к нулю” собственные значения, позволяет разделить и поля, формируемые на РИК на два соответствующих типа. При этом пороговое значение определяет количество тестирующих воздействий, необходимых для формирования плоских полей, и, соответ-

ственно, измерений ЭПР объекта при заданных размерах рабочей зоны.

На рис. 7 представлены зависимости количества тестирующих воздействий, определенных в соответствии с пороговым значением, от размера рабочей зоны для различных радиусов эквидистантной круговой АР. Полученные зависимости могут быть аппроксимированы линейно. Кроме того, для различных размеров антенных систем пороговые значения совпадают.

Из зависимостей, представленных на рис. 7, установлено, что при размере рабочей зоны $D = 10\lambda$ и размерах антенной системы $R = 20\lambda$ номер собственного вектора соответствующего пороговому собственному значению составляет 161. В то же время оценка требуемого количества те-

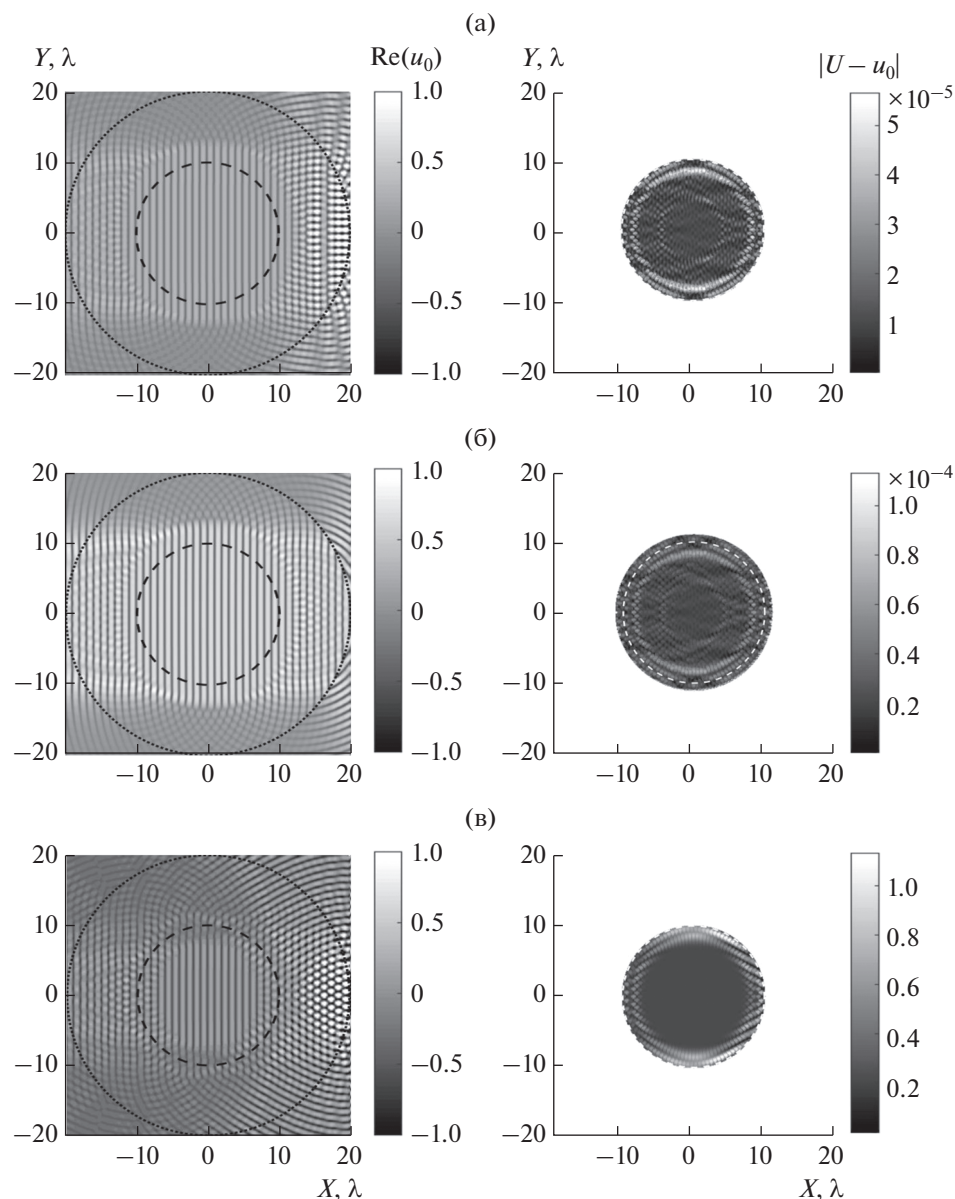


Рис. 8. Качественные картины поля (левая колонка), формируемого в рабочей зоне, для случаев ограниченного количества тестирующих воздействий (180 (а), 144 (б), 120 (в), всего воздействий 720) в виде сферических волн, и соответствующие погрешности формируемых полей (правая колонка).

стирующих воздействий, проведенная ранее, для тех же параметров антенной системы показала значение 136. Исходя из аппроксимированных зависимостей (см. рис. 7) 136 тестирующих воздействий обеспечивают формирование плоского поля в рабочей зоне с размером $D = 8\lambda$. При заданных размерах рабочей зоны в действительности плоское поле формируется в большей рабочей области, что наглядно видно на рис. 3. Данная особенность связана с закономерностями радиального распределения интенсивности поля при мультифокусировке, которое описывается функцией Бесселя. Кроме того, закономерности спада

интенсивности в направлении к центру антенной системы определяют и резкие пороговые значения, полученные при численном решении.

Собственные векторы оператора преобразования из подпространства тестирующих “сферических” полей в подпространство требуемых плоских полей образуют базис, в котором оператор является оператором простой структуры. Этот базис представляет собой набор мультифокусных тестирующих полей. Собственные значения являются весовыми коэффициентами, характеризующими вклад в результат формирования совокупности требуемых плоских полей, каждого из мультифокусных

тестирующих воздействий. Задание порога модуля собственных значений фактически определяет критерий линейной независимости собственных векторов и позволяет ограничить количество базисных векторов, описывающих преобразование с заданной точностью.

Полученный результат позволяет сделать еще несколько важных выводов. Известно, что в N -мерном пространстве любая линейно независимая система из N векторов образует базис, а любая система из $N + 1$ -вектора линейно зависима [9]. Поэтому уменьшение размерности пространства в новом базисе в виде мультифокусных полей позволяет говорить о том, что возможно уменьшить количество линейно независимых тестирующих воздействий и в любом другом базисе, в том числе и при использовании в качестве тестовых воздействий сферических волн (см. (3)). Как отмечалось выше, при ограничении количества тестирующих воздействий коэффициенты формирования плоского поля, найденные ранее для полной совокупности тестирующих полей, не оптимальны. При каждом ограничении количества тестирующих воздействий необходимо проводить уточнение коэффициентов формирования плоского поля.

Для подтверждения возможности ограничения количества тестирующих воздействий в виде сферических волн проведено численное моделирование, результаты которого приведены на рис. 8. При ограничении количества тестирующих воздействий проводилось уточнение коэффициентов, что позволило снизить погрешность формируемого плоского поля.

Анализ полученных результатов подтверждает получение выше закономерности реализуемых размеров рабочей зоны и количества тестирующих воздействий. Так на рис. 8а представлены результаты формирования поля для антенной системы с радиусом $R = 20\lambda$ в рабочей зоне размером $D = 10\lambda$ при количестве тестирующих воздействий 180, что превышает требуемый порог, который составляет 138. На рис. 8б представлены результаты формирования поля при ограничении количества тестирующих воздействий до 144, что превышает расчетные значения. При этом наблюдается увеличение погрешности формирования поля в рабочей зоне РИК. Для случая, когда количество тестирующих воздействий уменьшено до 120, что ниже порога (рис. 8в), в контуре размеров рабочей зоны погрешности формирования поля неприемлемы, однако в уменьшенном контуре плоское поле формируется с меньшей погрешностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при матричном методе изменений преобразование тестирующих полей в тре-

буемые плоские поля описывается линейным оператором, действующим в пространстве состоящим из тестирующих и требуемых полей. Размерность данного пространства, в зависимости от требуемой точности формирования плоских полей и размера рабочей зоны, может быть ограничена. Тем самым может быть ограничено и количество базисных векторов в этом пространстве, а значит, и количество тестирующих воздействий, требуемых для формирования плоских полей в рабочей зоне.

Для радиолокационных комплексов матричного типа с кольцевыми эквидистантными антенными решетками собственными векторами линейного оператора преобразования тестирующих полей в требуемые плоские поля являются собственные моды цилиндрических резонаторов. Поля, соответствующие собственным модам, имеют мультифокусную структуру. Максимумы интенсивности этих полей расположены по окружности, радиус которой однозначно определяется порядком моды. Такая пространственная закономерность позволяет оценить пороговый номер моды, радиус мультифокусировки которой превышает размеры рабочей зоны. Данный пороговый номер определяет требуемое количество тестирующих воздействий, необходимое для формирования совокупности плоских полей в ограниченных размерах рабочей зоны. При этом минимально необходимое количество тестирующих воздействий не зависит от размера антенной системы, а определяется размерами рабочей зоны РИК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов Е.С., Емельянов С.В., Агеев Д.М. // Радиотехника. 2014. № 9. С. 84.
2. Кирьянов О.Е., Мартынов Н.А., Понькин В.А. // Антенны. 2005. № 7. С. 37.
3. Емельянов Е.С., Понькин В.А. // Радиотехника. 2008. № 6. С. 98.
4. Bennett J.C., Schoessow E.P. // Proc. IEEE. 1978. V. 125. № 3. P. 179.
5. Kazuhiro Komiya, Ryo Yamaguchi, Keizo Cho // Int. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP 2009), 20–23 Oct., Bangkok, 2009. P. 1139.
6. Wang H., Miao J., Jiang J., Wang R. // Progress in Electromagnetics Research. 2012. V. 22. P. 245.
7. Poulton G.T. // IEEE APS Digest. 1989. V. 1. P. 90.
8. Hill D.A. // IEEE Trans. 1985. V. EMC-27. № 4. P. 201.
9. Воеводин В.В. Линейная алгебра. М.: Наука, 1980.
10. Икрамов Х.Д. Численное решение матричных уравнений. М.: Наука, 1984.
11. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. М.: Высш. школа, 1990.