УДК 621.396

М. А. ВИЛЬКОЦКИЙ, Г. П. ЛИЧКО

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ДАННЫХ ЕЕ АФР

Рассмотрен метод представления результатов измерений ближних полей, позволяющий значительно уменьшить объем хранимой информации об амплитудно-фазовых распределениях антенных систем.

Ряд теоретических и экспериментальных задач по определению характеристик антенных систем (АС) сводится к расчету или измерению амплитудно-фазовых распределений (АФР) в некоторой области пространства. Большие размеры массивов информации об АФР для АС с изменяющимися в процессе функционирования характеристиками затрудняет решение этих задач из-за большого объема данных об АФР. Действительно, например, для набора измеренных величин f_k (для E- и H-поляризаций и где $1 \leq k \leq K$), если каждый из k наборов определяется матрицей порядка IJ значений, для хранения результатов измерений с помощью обычных методик необходимо помнить $2IJK$ комплексных чисел. Это обстоятельство для реальных значений I и J приводит к необходимости иметь ЭВМ с чрезмерно большой памятью.

Рассмотрим метод представления результатов измерений ближних полей, позволяющий значительно уменьшить объемы хранимой информации об АФР.

Для оптимизации представления результатов измерений ближних полей АС воспользуемся известным из теории матриц методом сингулярного разложения матриц с нахождением сингулярных значений. Установлено [1], что любую матрицу G длиной IJ можно представить в виде

$$G = U\Lambda V^{\tau *}, \tag{1}$$

где Λ — диагональная матрица длиной IJ, по диагонали которой расположены положительные числа, называемые сингулярными значениями, U — унитарная матрица длиной II, удовлетворяющая условиям $UU^{\tau *} = U^{\tau *}U = E$; V — унитарная матрица длиной JJ, удовлетворяющая условиям $VV^{\tau *} = V^{\tau *}V = E$; E—единичная матрица соответствующей длины; τ — обозначает транспонирование, $*$ — комплексное сопряжение.

В дальнейшем считаем: $I \geqslant J$; сингулярные значения λ_i ($i = 1, 2, \ldots, J$) являются положительным квадратным корнем из собственных значений матрицы $GG^{\tau *}$; i-е столбцы матриц U и V являются собственными значениями матрицы $G^{\tau *}G$, т. е. выполняются соотношения $GG^{\tau *} = U\Lambda U^{\tau *}$, $G^{\tau *}G = V\Lambda V^{\tau *}$. Таким образом, представляя АФР в виде (1), можно получить матрицы U, V, согласованные с данным АФР (превращения его в диагональную матрицу). Вследствие унитарности матриц U и V небольшие отличия между каждой из матриц f_k, входящих в набор измерений, выявляются однозначно в изменении сингулярных чисел. Реализуем этот подход. Пусть имеется матрица результатов измерений f_1, принятая за базисную. Представляя эту матрицу в виде (1), получаем матрицы U_1 и V_1. Так как матрицы U_1, V_1 унитарны, то любую матрицу из набора f_l можно представить в виде

$$\Lambda_l = U_1^{\tau *} f_l V_1, \tag{2}$$

где Λ_l — результат разложения матриц f_l в исходном базисе матрицы f_1. Так как базисные матрицы U_1, V_1 согласованы с исходной матрицей f_1, превращая ее в диагональный вид, то этот базис будет близок к оптимальному и для f_l, превращая их в слабозаполненные матрицы Λ_l с конечным числом комплексных ненулевых элементов. Следовательно, задача хранения набора измерений и их дальнейшей обработки сводится к задаче хранения базисных матриц U_1, V_1 и матриц разложения Λ_l, получаемых с помощью (2) и дальнейшей их обработки. В результате такой подход приводит к значительному уменьшению объема памяти для хранения обрабатываемых матриц результатов измерений. Эмпирически установлено, что в качестве базисного набора измерений наиболее удобно пользоваться таким набором, который является центром симметрии по отношению ко всем наборам измерений.

Приведем экспериментальные результаты, показывающие эффективность описанного подхода. Имелся набор измерений АФР, состоящий из 8 массивов длиной 64×64 отсчетов, полученный для АС, включающей в себя радиопрозрачную защитную оболочку (ЗО) при изменяющейся взаимной ориентации АС и ЗО по угловой координате с дискретом 5 градусов. В результате применения соотношений (1) и (2) были получены (см. таблицу) параметры разложения для Λ_i (с пренебрежением членов, лежащих ниже уровня —30 дБ).

α	Нет ЗО	−15	−10	−5	0	5	10	15
N	12	11	14	16	8	15	11	10

Из приведенных данных следует, что для хранения 8 наборов измерений, включающих 32 768 точек, необходимо иметь память для хранения двух матриц длиной 64×64 U_1, V_1 и всего 97 точек для хранения сингулярных значений. Очевидно сокращение объема памяти в 3,9 раза, увеличение числа наборов приведет к еще большему сокращению объема требуемой памяти. Так как сингулярные значения λ_{ijk} группируются в почти постоянной области матриц Λ_i, возможно дополнительное уменьшение объема памяти за счет хранения соответствующих столбцов матриц U_1, V_1. Таким образом в приведенном случае удалось уменьшить объем памяти в 37 раз.

Итак, реализация описанного метода хранения и представления результатов измерений АФР производится следующим образом:

осуществляется сингулярное разложение избранного в качестве базисного набора измерений АФР с целью получения базисных векторов U_1 и V_1 посредством соотношения (1);

полученные значения базисных векторов U_1 и V_1 используются для вычисления матрицы сингулярных чисел Λ_i, являющихся представлением каждого набора измерений в избранном базисе;

осуществляется хранение базисных векторов U_1 и V_1 и членов матриц Λ_i, больших некоторого предела.

Применение описанного метода представления результатов измерений АФР приводит к незначительной первоначальной потере времени работы ЭВМ. Так, время нахождения базисных векторов на ЭВМ ЕС-1022 составило 2 минуты, время нахождения матрицы Λ_i — 1 минуту. Однако при дальнейшей обработке с использованием результатов рассмотренного представления АФР достигается значительное увеличение быстродействия вследствие сепарабельности результатов разложения. Рассмотрим случай цифровой фильтрации, охватывающий обширный класс линейных преобразований.

Итак, в результате применения (1), АФР представим в виде

$$f_i = U_1 \Lambda_i V_1^{\tau *} = \sum_j \sum_k \lambda_{ijk} \mathrm{U}_{1j} \mathrm{V}_{1k}^{\tau *}, \qquad (3)$$

где U_{1j}, V_{1k} — соответствующие столбцы базисных матриц U, V_1.

Пусть осуществляется цифровая фильтрация с помощью фильтра с сепарабельной конечной импульсной характеристикой:

$$h(p, q) = h_1(p) h_2(q), \qquad (4)$$

где $1 \leqslant p \leqslant P$; $1 \leqslant q \leqslant Q$.

Цифровая фильтрация значений f_i приведет к выражению

$$q_i(j,k) = \sum_{p=1}^{P} \sum_{q=1}^{Q} h(j-p, k-q) f_i(j,k) =$$

$$= \lambda_{ijk} \sum_{p=1}^{P} h_1(j-p) \mathrm{U}_{1j} \sum_{q=1}^{Q} h_2(k-q) \mathrm{V}_{1k}^{\tau *}. \qquad (5)$$

Следовательно, реализация двумерного сепарабельного цифрового КИХ-фильтра осуществляется посредством одномерной фильтрации (5) соответствующих столбцов базисных матриц U_1 и V_1, что приводит к значительному убыстрению цифровой обработки, все возрастающему с увеличением числа наборов АФР, выраженных через заданные базисные матрицы.

Все изложенное показывает эффективность рассмотренного способа при хранении информации двумерных наборов АФР, принадлежащих одной антенной системе.