

В качестве примера использования описанной установки рассмотрим эксперимент, в котором регистрируется ИНДОР-спектр в спиновой системе типа A_3B_2 (протоны бромистого этила на частоте 60 МГц). Спектр ЯМР этого соединения схематически изображен на рис. 2, а. Стрелкой отмечена линия в спектре метильной группы, на которой селективно возбуждалась спиновая генерация. Поле внешнего генератора последовательно возмущались группы линий B и C в спектре метиленовой группы, более подробно изображенные на рис. 2, в. На рис. 2, б приведен ИНДОР-спектр, полученный путем регистрации изменений амплитуды колебаний СГБП в указанных условиях. В рассматриваемом примере СГБП выполняет функции индикатора ядерной намагниченности, изменяющейся под действием возмущающего поля. При возмущении регрессивного перехода намагниченность и амплитуда колебаний СГБП уменьшаются, при возмущении прогрессивного перехода — увеличиваются.

Описанная аппаратура может быть использована при проведении других многочастотных экспериментов, например при исследовании спектров комбинационных частот [10] и т. п., а также при селективном измерении времен продольной релаксации [6, 7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Freeman R., Morris G. A. J. Magn. Res., 1978, 29, p. 433. [2] Tomlinson B. L., Hill H. D. W. J. Chem. Phys., 1973, 59, p. 1775. [3] Heinrichs P. M., Schwartz L. J. J. Chem. Phys., 1978, 69, N 2, p. 622. [4] Pashler K. C. P., Wessels P. L. Org. Magn. Res., 1980, 13, p. 100. [5] Константинов Ю. С., Смирнов А. М. В кн.: Тезисы докл. на XI Европ. конгр. по молекулярной спектроскопии. Таллин, 1973, с. 69 (С1). [6] Константинов Ю. С., Смирнов А. М., Варламов С. Д. В кн.: Труды XX конгр. АМПЕРЕ. Таллин, 1979, с. 577. [7] Константинов Ю. С., Смирнов А. М. Приб. и техн. эксперимента, 1980, № 2, с. 143. [8] Константинов Ю. С., Смирнов А. М. Радиотехника и электроника, 1972, 17, № 11, с. 2456. [9] Hobson R. F., Kaiser R. J. Magn. Res., 1975, 20, p. 458. [10] Синивэе В., Салум В. Изв. АН ЭССР, Сер. Физ. Матем., 1968, 17, № 1, с. 49.

Поступила в редакцию
27.08.81

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1982, Т. 23, № 4

УДК 537—961:621.396.671.3

ОСОБЕННОСТИ ПРИЕМНЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ, СОСТОЯЩИХ ИЗ НЕЗАВИСИМО НАГРУЖЕННЫХ ВИБРАТОРОВ

Г. П. Бояхчян, В. А. Ванке, С. К. Лесота

(кафедра радиофизики СВЧ)

Использование ректенны (антенны-выпрямителя) при приеме и преобразовании СВЧ-энергии в энергию постоянного тока в качестве наземной системы солнечных космических электростанций представляется в настоящее время перспективным [1—4]. По сравнению с другими подобными системами ректенна имеет ряд преимуществ. В частности, экспериментально доказано, что приемная поверхность ректенны имеет слабую направленность, и, таким образом, не возникает проблемы согласования распределения освещения с диаграммой направленности приемной апертуры, а также отсутствуют проблемы, связанные с неоднородностью интенсивности и фазы освещения на приемной апертуре и т. д. [1].

Существуют сравнительно общие подходы к анализу систем связанных вибраторов с различными типами распределителя принимаемой мощности [5]. Однако, по существу, остаются невыясненными физические отличия и закономерности антенных систем, состоящих из независимо нагруженных вибраторов, к которым относится ретенна.

Рассмотрим антенную систему из N идентичных, расположенных параллельно на плоскости вибраторов с независимыми нагрузками, когда на систему падает плоская электромагнитная волна с оптимальной линейной поляризацией. Оптимальной считается поляризация с максимально возможной (для данного направления падения СВЧ-луча) проекцией электрического поля по направлению вибраторов.

Методом наведенных ЭДС [6] можно получить систему уравнений, связывающую токи и напряжения в вибраторах, наведенные электрическим полем падающей волны:

$$([Z] + Z_n [E]) |I\rangle = \frac{\lambda EF(\theta)}{\pi} |e^{i\Delta_{1n}}\rangle, \quad (1)$$

где $[Z]$ — матрица собственных и взаимных сопротивлений [5], $[E]$ — единичная матрица, Z_n — величина нагрузки (для простоты будем

считать, что вибраторы имеют одинаковые нагрузки), $|I\rangle = \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix}$ —

обозначение Дирака для матрицы столбца токов, $|e^{i\Delta_{1n}}\rangle = \begin{pmatrix} e^{i\Delta_{11}} \\ \vdots \\ e^{i\Delta_{1N}} \end{pmatrix}$ —

обозначение матрицы столбца фазовых задержек, Δ_{1n} — разность хода луча между вибраторами 1 и n , λ — длина волны, E — амплитуда напряженности электрического поля падающей волны в плоскости вибраторов, $F(\theta)$ — диаграмма направленности одиночного вибратора.

Для обозначения матрицы строки будем также использовать обозначение Дирака, например $\langle I| = (I_1 \dots I_N)$.

Решая систему (1), получаем

$$|I\rangle = \frac{\lambda EF(\theta)}{\pi} ([Z] + Z_n [E])^{-1} |e^{i\Delta_{1n}}\rangle. \quad (2)$$

Суммарная мощность, которая выделяется на нагрузках, рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} P &= \frac{R_n}{2} \langle I | I^* \rangle = \\ &= \frac{R_n}{2} \left[\frac{\lambda |E| F(\theta)}{\pi} \right]^2 \langle e^{i\Delta_{1n}} | ([Z] + Z_n [E])^{-1} \times \\ &\quad \times ([Z]^* + Z_n^* [E])^{-1} | e^{-i\Delta_{1n}} \rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

где $R_n = \text{Re} Z_n$, $([\dots])^{-1}$ — обратная матрица. При выводе (3) мы учли, что $[Z]$ является симметричной матрицей [5].

Рассмотрим теперь передающую систему из тех же N вибраторов, которые возбуждаются взаимно некогерентными источниками, имеющими равные модули средних по времени значений амплитуд $|U|_{\text{cp}}$ и внутренние сопротивления Z_G .

Поле, созданное вибраторами в дальней зоне, равно [6]

$$E = \frac{60}{r_0} F(\theta) \langle I | e^{i\Delta_{1n}} \rangle, \quad (4)$$

где r_0 — расстояние от вибраторов до точки в дальней зоне. Уравнение, связывающее токи в вибраторах с напряжениями источников, имеет вид

$$([Z] + Z_G[E]) |I\rangle = |U\rangle. \quad (5)$$

Используя (4) и (5), можно получить следующее выражение для среднего по времени значения квадрата модуля электрического поля:

$$\begin{aligned} |E|_{\text{cp}}^2 &= \left[\frac{60}{r_0} F(\theta) \right]^2 \langle e^{i\Delta_{1n}} | ([Z] + Z_G[E])^{-1} (|U\rangle \langle U^*|)_{\text{cp}} \times \\ &\quad \times ([Z^*] + Z_G^*[E])^{-1} | e^{-i\Delta_{1n}} \rangle = \\ &= \left[\frac{60}{r_0} F(\theta) \right]^2 |U|_{\text{cp}}^2 \langle e^{i\Delta_{1n}} | ([Z] + Z_G[E])^{-1} ([Z^*] + Z_G^*[E])^{-1} | e^{-i\Delta_{1n}} \rangle. \quad (6) \end{aligned}$$

При выводе (6) мы учли, что источники взаимно некогерентны, и поэтому $(|U\rangle \langle U^*|)_{\text{cp}} = |U|_{\text{cp}}^2 [E]$.

Сравнивая (6) с (3), приходим к главному выводу, что характеристики приемной системы из N вибраторов, имеющих независимые нагрузки, совпадают с передающими характеристиками системы из тех же вибраторов, которые возбуждаются взаимно некогерентными вибраторами, в том числе совпадают диаграммы направленности.

Из этого следует, в частности, что система вибраторов с независимыми нагрузками имеет относительно слабую направленность из-за отсутствия когерентного увеличения или уменьшения поля в соответствующих направлениях, что свойственно системам с когерентным возбуждением вибраторов.

Таким образом, полученные результаты позволяют:

а) перейти от анализа ректенных систем к анализу излучающей системы из N вибраторов с некогерентным возбуждением, т. е. к задаче, которая может быть сформулирована и решена более строго;

б) понять физическую причину основных особенностей ректенных систем, состоящую в слабой направленности и, следовательно, в слабой чувствительности к амплитудным и фазовым искажениям волнового фронта облучающего луча;

в) расширить понятие взаимности в теории приемных антенных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Brown W. C. IEEE spectrum, 1973, 10, N 3, p. 38. [2] Brown W. C. IEEE spectrum, 1979, 16, N 6, p. 36. [3] Andruszyk R., Foldes P. et al. IEEE spectrum, 1979, 16, N 7, p. 51. [4] Ванке В. А., Лопухин В. М., Саввин В. Л. Успехи физ. наук, 1977, 123, № 4, с. 633. [5] Сазонов Д. М. Матричная теория антенных решеток. Рязань: Изд-во Ряз. политехн. ин-та, 1975. [6] Айзенберг Г. З. Коротковолновые антенны. М.: Связьиздат, 1962.

Поступила в редакцию
27.08.81