

НАТУРНАЯ ИМИТАЦИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НА ОСНОВЕ ВИРКАТОРОВ

*Б.В. Алехин, А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир, Н.В. Степанов,
О.А. Шамро, К.В. Шибалко*

При помощи волноводного имитатора осуществлено моделирование излучения импульсно-периодической фазированной антенной решетки с виркаторами в качестве элементов решетки. Исследовано искажение суммарного импульса вследствие неодновременности прихода парциальных сигналов.

При разработке фазированных антенных решеток (ФАР) важно заранее знать характеристики ее излучения: коэффициент усиления, качество сложения парциальных волн от отдельных излучателей и т.д., однако теоретически рассчитать эти характеристики чаще всего не удается. Поэтому прибегают к экспериментальным методам, когда поле излучения ФАР моделируется с помощью одного излучателя (СВЧ генератора), помещенного в так называемый имитатор ФАР [1,2].

В последнее время получили развитие мощные ФАР с релятивистскими СВЧ генераторами в качестве своих элементов [3]. Обычно такие генераторы представляют собой дорогостоящие устройства, выполненные на основе высокопоточных ускорителей электронов. Поэтому предварительное исследование одиночного СВЧ генератора в имитаторе ФАР особенно актуально.

Имитатор ФАР обычно представляет собой сверхразмерный волновод с зеркальными стенками и излучателем на оси. Форма поперечного сечения волновода определяет элементарную ячейку моделируемой ФАР. Принцип действия имитатора сходен с принципом действия калейдоскопа и основан на многократных отражениях электромагнитной волны от стенок волновода, при которых формируется бесконечное поле изображений (рис. 1). Поэтому сигнал, регистрируемый приемником, будет идентичен сигналу от бесконечной идеально синфазной ФАР.

В реальном случае мы имеем дело с излучателем, диаграмма направленности которого практически сосредоточена в некотором конусе, ось которого совпадает с осью излучателя. В этом случае моделируется ФАР с конечным количеством элементов решетки. Особенностью имитации импульсной ФАР, когда длительность импульса излучателя сравнима с временем распространения сигнала до приемника, является неизохронность прихода парциальных сигналов. Это приводит к динамической перестройке суммарного сигнала, проявляющейся, например, в затягивании его заднего фронта.

Эффекты динамической перестройки легко учесть в приближении геометрической оптики. При этом неизохронность прихода парциальных сигналов соответствует кажущейся волне возбуждения элементов ФАР, движущейся со скоростью

$$v = cy(L^2 + y^2)^{-1/2}, \quad (1)$$

где L - расстояние между генератором и приемником, c - скорость света, y - поперечная координата ($y = nD$, D - период решетки, n - номер изображения). Тогда суммарный сигнал можно записать в виде

$$p(t) = \sum_{n=0}^{\infty} p_0 \{ t - (1/c) [(L^2 + n^2 D^2)^{1/2} - L] \} \frac{g_n f_E(\varphi_n) f_R(\varphi_n)}{1 + (nD/L)^2} R^n(\varphi_n), \quad (2)$$

где $p_0(t)$ - сигнал с одного генератора в свободном пространстве, $f_E(\varphi_n)$ и $f_R(\varphi_n)$ - диаграммы направленности антенн генератора и приемника соответственно, нормированные так, чтобы $f_E(0) = f_R(0) = 1$, $R(\varphi_n)$ - коэффициент отражения электромагнитной волны стенкой имитатора, $\varphi_n = \arctg(nD/L)$, $g_n = 1$ при $n=0$ и $g_n = 2$ в остальных случаях. Согласно (2), возможна имитация лишь конечной ФАР, размер которой определяется угловыми характеристиками антенн $f_E(\varphi_n)$ и $f_R(\varphi_n)$.

В экспериментах по натурной имитации ФАР элементом решетки (излучателем) являлся импульсный СВЧ генератор типа виркатор [4], являющийся, по сути, единственным генератором, способным работать без магнитного сопровождения пучка, что упрощает создание импульсно-периодической ФАР на его основе. Характеристики излучения виркатора следующие: выходная мощность - более 100 МВт, длина волны излучения - 3 см, длительность импульса - 20 нс, частота повторения импульсов - до 10 Гц, поляризация круговая, диаграмма направленности, представленная на рис. 2, имеет двухлепестковый профиль с эффективным углом полураствора 18° .

Виркатор помещался в середину плоского волновода с металлическими стенками длиной 3000 мм, расстояние между которыми составляло 720 мм. В качестве приемника использовался расположенный в отрезке волновода размерами 23×10 мм полупроводниковый детектор, аналогичный описанному в [5]. Отрезок волновода приемника возбуждался с помощью приемной антенны с диаграммой направленности, лежащей в 22° -ом угле полураствора по уровню 0.5. Сам приемник располагался на расстоянии $L = 3000$ мм от излучателя.

В такой конфигурации осуществляется имитация конечной линейной ФАР с периодом $D = 720$ мм, длина которой и количество элементов в ней определяются в основном диаграммой направленности виркатора.

Результаты имитации представлены на рис. 3, где приведены осциллограммы огибающих СВЧ сигналов: a - для одного генератора в свободном пространстве; b - для генератора, расположенного вдоль одной отражающей поверхности (генератор + одно изображение); c - для генератора в имитаторе.

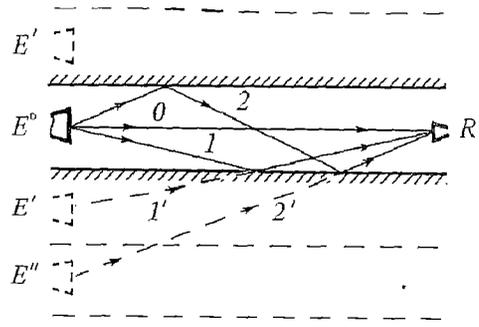


Рис. 1. Схема имитатора ФАР

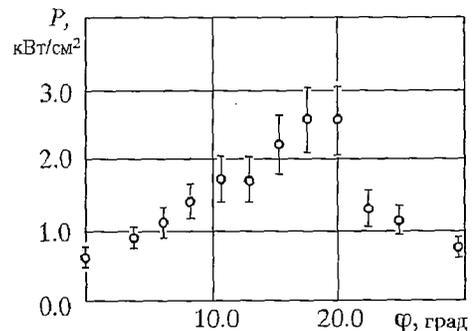


Рис. 2. Диаграмма направленности виркатора

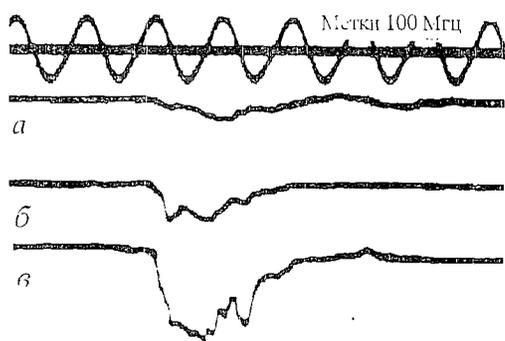


Рис. 3. Осциллограммы огибающих СВЧ сигналов

Расчеты по формуле (2) и анализ осциллограмм рис. 3 показывают, что основной вклад в излучение оказывают лишь $N=2n+1=7$ генераторов моделируемой ФАР, а уширение сигнала не превышает

$$\Delta t = (1/c)((L^2 + n^2 D^2)^{1/2} - L) = 3 \text{ нс.}$$

Эти результаты свидетельствуют о возможности натурального моделирования ФАР с помощью лишь одного генератора. Разумеется, такая имитация возможна и для излучателей ИК и оптического диапазонов.

Библиографический список

1. Hannan P.W., Meier P.J., Balfour M.A. Simulation of Phased-Array Antenna Impedance in Waveguide// IEEE Trans. Antenna Propagat. 1963. № 11. P. 715.
2. Wheeler H.A. A Survey of the Simulator Technique for Designing a Radiating Element in a Phased-Array Antenna// Phased-array antennas/ Eds. Dedham. Mass. Artech house, 1970.
3. Levine J.S., Aiello N., Benford J., Harteneck B. Design and Operation of a Module of Phase-Locked Relativistic Magnetrons// J. Appl. Phys. 1991. Vol. 70, № 5. P. 2838.
4. Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. Виркаторы // РЭ. 1992. Т.37, № 3. С. 385.
5. Райзер М.Д., Цопп Д.Э. Детектирование и измерение мощности СВЧ излучения наносекундной длительности // РЭ. 1975. Т. 20, № 8. С. 1691.

Российский Федеральный ядерный центр
ВНИИ экспериментальной физики

Поступила в редакцию 7.10.94
после переработки. 25.04.95

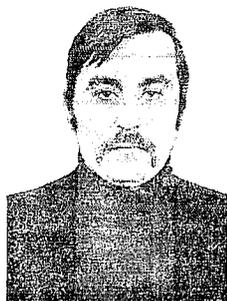
A FULL-SCALE SIMULATION OF A PULSED VIRCATOR-BASED PHASED ARRAY

B.V.Alekhin, A.E.Dubinov, V.D.Selemir, N.V.Stepanov,
O.A.Shamro, K.V.Shibalko

With the help of a waveguide simulator there was carried out the modeling of a phased array with vircators in the capacity of the array elements. The distribution of a total pulse because of non-simultaneity of partial signals arrival was investigated.



Алексей Борис Васильевич - родился в 1944 году в Мелеузе, Башкортостан. Окончил Московский инженерно-физический институт (1969). С 1969 года работает во ВНИИЭФ в области квантовой радиофизики, а с 1990 года в области СВЧ электроники. Автор более 30 статей и докладов.



Дубинов Александр Евгеньевич - родился в 1958 году в городе Арзамас-16. Окончил Московский инженерно-физический институт по специальности приборостроение. Работает во ВНИИЭФ с 1984 года. Возглавляет теоретическую группу в лаборатории релятивистской СВЧ электроники. Область научных интересов - нелинейная динамика, физика плазмы. Автор более 20 публикаций.



Селамир Виктор Дмитриевич - родился в 1948 году в Черновцах, Украина. Окончил Харьковский государственный университет. Заведующий отделом физики высоких плотностей энергии и направленных потоков излучения. Область научных интересов: физика сильноточных ускорителей электронов, релятивистская СВЧ электроника. Автор более 30 публикаций.



Степанов Николай Владимирович - родился в 1957 году в Салавате. По окончании службы в Советской Армии поступил в Московский инженерно-физический институт. Закончив кафедру экспериментальной ядерной энергии (1987), начал работу во ВНИИЭФ в отделе физики высоких плотностей энергии. Занимается задачами, связанными с диагностикой электронных потоков и электромагнитных излучений. Одним из дополнительных направлений деятельности является исследование фрактальных моделей в ядерной физике.



Шамро Олег Алексеевич - родился в 1962 году. Окончил физико-технический факультет Уральского политехнического института по специальности квантовая радиофизика и физика твердого тела (1986). С того же года работает во ВНИИЭФ. Область научных интересов - диагностика и применение сильноточных электронных пучков. Автор и соавтор 10 статей и докладов, в том числе и на международных конференциях.



Шибалко Константин Викторович - родился в 1964 году в городе Арзамас-16. Окончил Горьковский государственный университет, радиофизический факультет. Работает во ВНИИЭФ с 1987 года научным сотрудником. Автор более 10 публикаций.