

УДК 537.867

СИНХРОНИЗАЦИЯ И СЛОЖЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН-ГЕНЕРАТОРОВ НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

В. И. Калинин, В. Д. Котов, В. Е. Любченко, Е. О. Юневич

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,
г. Фрязино, Россия

Экспериментально исследованы синхронизация и сложение мощностей излучения генераторов сверхвысоких частот, представляющих собой антенны логопериодического типа на диэлектрической подложке с полевыми транзисторами в качестве активных элементов. Показана возможность взаимной синхронизации антенн-генераторов, расположенных на общей диэлектрической подложке, обусловленной их взаимодействием с распространяющейся в подложке поверхностной волной. Также исследована возможность синхронизации антенн-генераторов внешним излучением. Обнаружено существенное сужение спектра и увеличение эффективности генерации излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Создание источников излучения в виде интегральных модулей, в которых активный элемент, диод или транзистор, монтируется непосредственно на антенну без промежуточных фидеров, и сложение мощностей сигналов от таких излучателей в пространстве является эффективным способом повышения выходной мощности полупроводниковых генераторов сверхвысокочастотного (СВЧ) и крайневых частотного (КВЧ) диапазонов [1]. Среди возможных конструкций антенн-генераторов особый интерес представляют антенны логопериодического типа благодаря возможности их использования в широком диапазоне длин волн — от сантиметровых до субмиллиметровых [2]. В качестве активных элементов привлекательно использование двухэлектродных приборов, таких как диоды Ганна, лавинно-пролётные или резонансно-туннельные диоды, однако с точки зрения коэффициента полезного действия (КПД), возможности перестройки частоты и ряда других важных параметров предпочтение отдаётся использованию транзисторов [3]. В настоящей работе исследовались эффекты взаимной синхронизации и синхронизации внешним сигналом генераторов на полевых транзисторах, интегрированных с логопериодической антенной, а также возможности оптимизации конструкции устройства для эффективного сложения мощностей их излучения.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Блок-схема установки для исследования процессов синхронизации и сложения мощностей излучения антенн-генераторов представлена на рис. 1. При исследовании процессов взаимной синхронизации таких устройств сигнал от матрицы поступает через рупорную антенну и СВЧ переключатель на ваттметр и параллельно через вибраторную антенну на анализатор спектра. При исследовании процессов внешней синхронизации антенн-генераторов сигнал от синхрогенератора через переключатель и рупорную антенну поступает на работающую антенну-генератор, а для измерения мощностей синхросигнала и излучения антенны-генератора — на ваттметр.

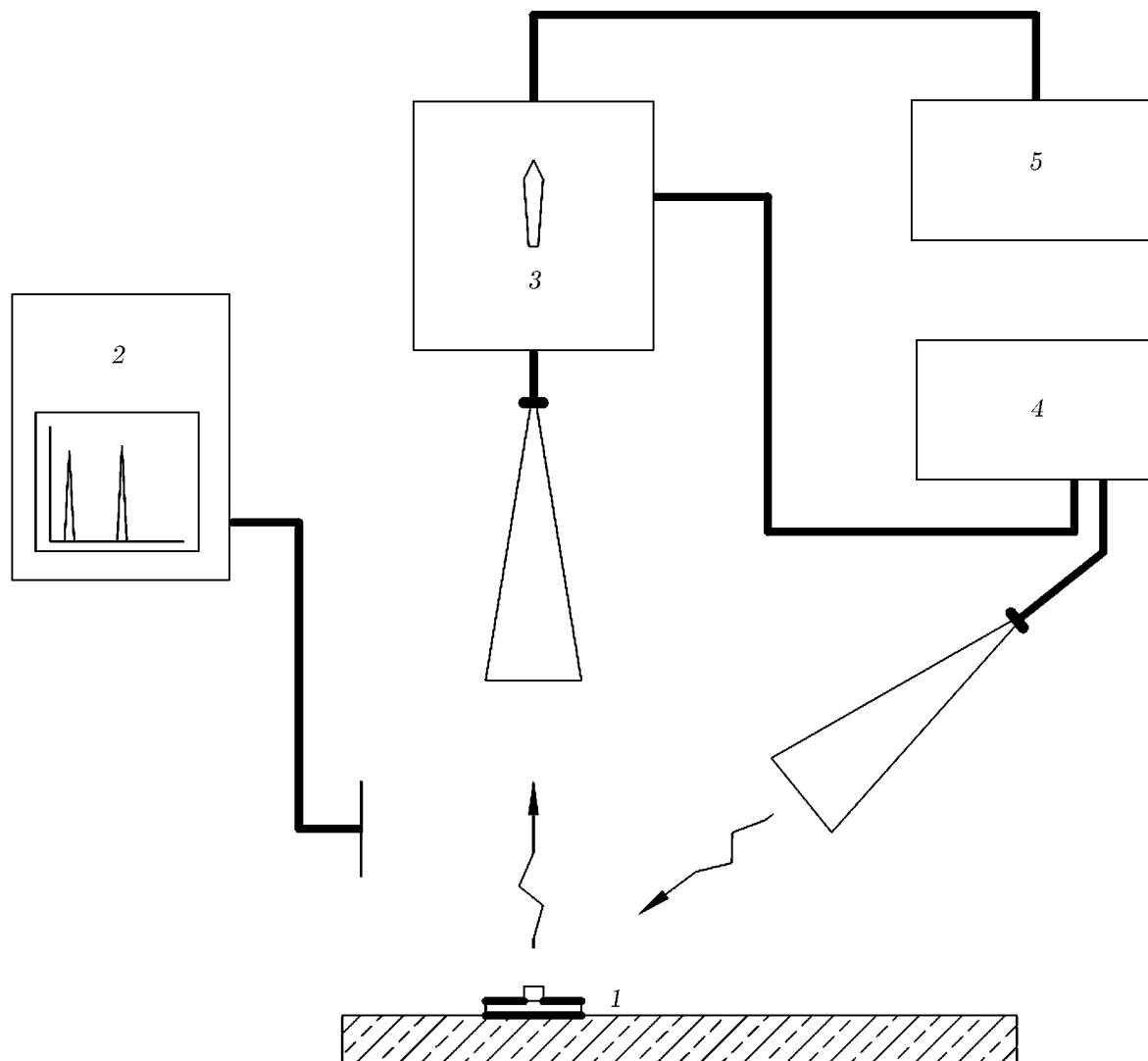


Рис. 1. Схема установки для исследования внешней синхронизации антенн-генераторов: 1 — антенна-генератор, 2 — анализатор спектра, 3 — СВЧ переключатель, 4 — синхрогенератор, 5 — ваттметр

2. ВЗАИМНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ АНТЕНН-ГЕНЕРАТОРОВ

Ранее [4] было обнаружено, что при расположении на одной подложке несколько независимых антенн-генераторов, имеющих разброс собственных частот генерации до 100 МГц, взаимно синхронизируются на частоте, как правило, не совпадающей с какой-либо из собственных частот таких устройств.

Взаимное влияние исследуемых излучателей может осуществляться двумя способами: через свободное пространство и поверхностными волнами в диэлектрической подложке. Чтобы выявить определяющий механизм, исходная матрица была разрезана на две части, как показано на рис. 2 пунктиром, и в зазор между ними помещена тонкая металлическая полоска. При этом взаимная синхронизация антенн-генераторов, расположенных по разные стороны от границы раздела, обычно прекращалась и наблюдать её можно было лишь при значительном (примерно до 5 МГц)

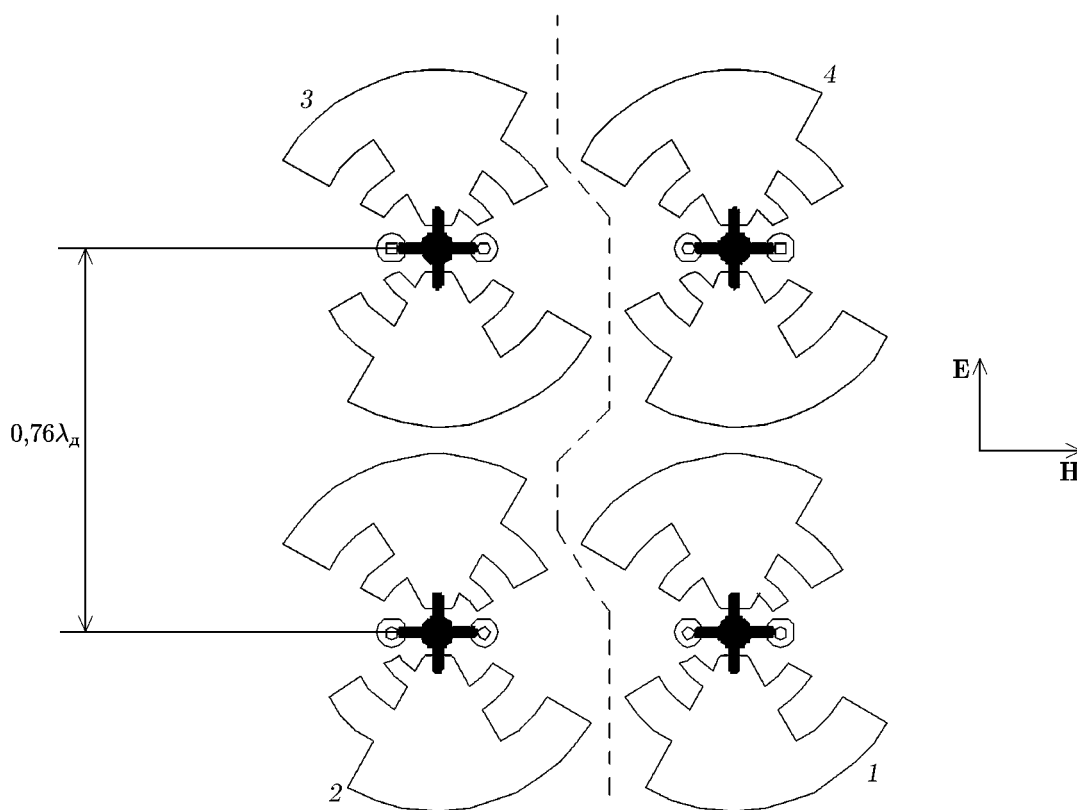


Рис. 2. Матрица из активных антенн 1, 2, 3, 4

сближении собственных частот колебаний этой пары антенн. Таким образом, интервал частот синхронизации излучателей, разделённых непрозрачным препятствием в подложке, уменьшался почти на порядок, что свидетельствует об определяющей роли поверхностной волны в диэлектрике для взаимной синхронизации антенн-генераторов в матрице.

На рис. 3 показаны спектры четырёх антенн-генераторов, работающих независимо при равных напряжениях питания на каждой из них, а также результирующий спектр при включении всех четырёх антенн. Видно, что, несмотря на довольно большой разброс собственных частот порядка 100 МГц, все антенны-генераторы начинают работать совместно на одной частоте, причём мощность излучения заметно превышает сумму мощностей излучения отдельно работающих антенн-генераторов. Частота излучения совместно работающих антенн может оказаться как выше, так и ниже собственных частот колебаний или лежать между ними.

Для эффективного сложения мощностей излучения нескольких независимых источников необходимо не только равенство их частот, но и совпадение фаз колебаний. Измерения показали, что при расстоянии между центрами двух антенн примерно $0,75\lambda_d$, где λ_d — длина волны в диэлектрике, фазы электромагнитных волн близки и происходит их когерентное суммирование в пространстве, что подтверждается сужением вдвое диаграммы направленности излучения, см. рис. 4.

Таким образом, по-видимому, достаточно просто организовать сложение мощностей излучения небольшого количества линейно расположенных излучателей. В случае двумерной матрицы всего из четырёх элементов, даже если антенны-генераторы и работают синхронно, результирующая диаграмма направленности очень широка и, в общем случае, имеет многолучевой профиль.

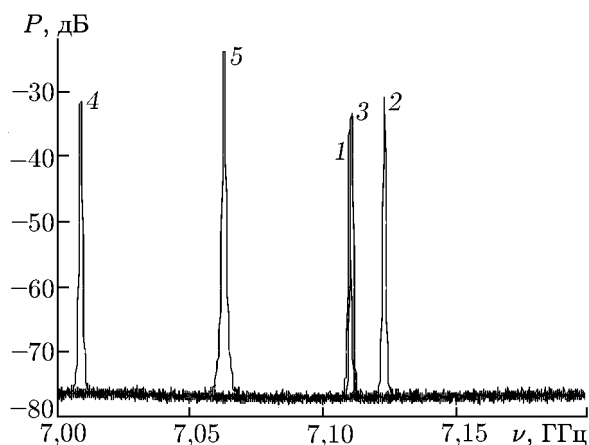


Рис. 3. Спектр излучения антенн: P — мощность излучения, ν — частота. Номера кривых 1, 2, 3 и 4 соответствуют номерам включённых антенн-генераторов. Кривая 5 соответствует случаю, когда антенны-генераторы включены одновременно

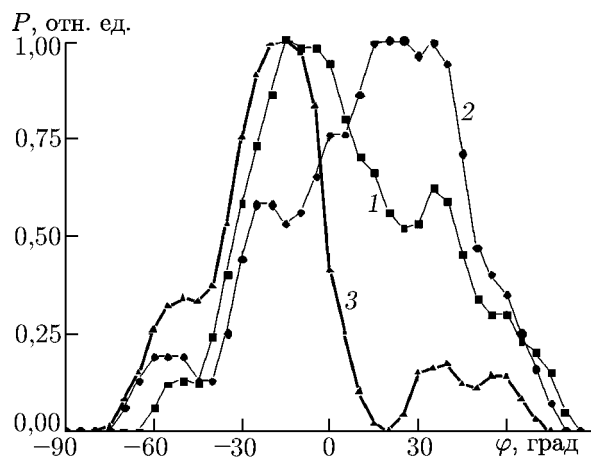


Рис. 4. Диаграммы направленности антенны-генератора 2 (кривая 1) и 3 (кривая 2), а также матрицы таких устройств (кривая 3) в плоскости вектора \mathbf{E}

Это связано, скорее всего, с тем, что невозможно организовать матрицу таким образом, чтобы во всех направлениях между антеннами-генераторами поддерживался баланс фаз.

3. СИНХРОНИЗАЦИЯ АНТЕНН-ГЕНЕРАТОРОВ ВНЕШНИМ ПОЛЕМ

Проблему синхронизации большого количества активных антенн можно решить внешним облучением матрицы антенн-генераторов. В настоящей работе с целью исследования эффективности внешней синхронизации отдельно взятая антенна-генератор с собственной частотой порядка 10 ГГц облучалась электромагнитным полем от внешнего источника. При сближении частот синхросигнала и собственной частоты антенны-генератора наблюдалось подтягивание последней к частоте синхросигнала, асинхронное взаимодействие с генерацией на комбинационных частотах и в некоторой полосе скачкообразный захват частоты антенны-генератора. В условиях эксперимента полоса синхронизации изменялась от 5 до 200 МГц при плотности потока энергии синхросигнала в плоскости антенны-генератора от 1 до 80 мкВт/см² (кривая 1 на рис. 5). При перестройке частоты синхросигнала после захвата частота антенны-генератора перестраивалась в более широком диапазоне (кривая 2 на рис. 5). При этом мощность синхросигнала, принимаемого антенной, была на два–три порядка меньше мощности её излучения.

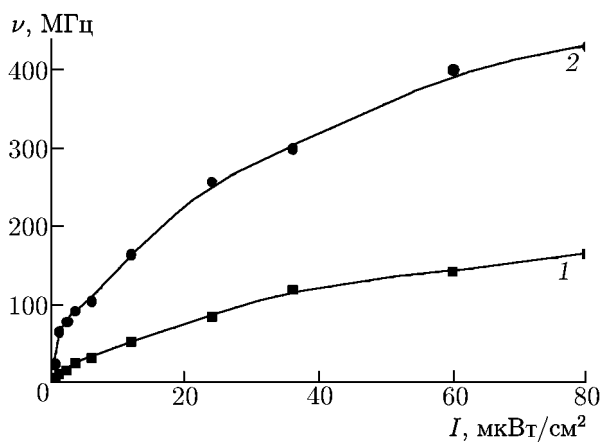


Рис. 5. Полоса синхронизации (1) и полоса перестройки (2) антенны-генератора в зависимости от плотности потока энергии синхросигнала I

Измерения спектров сигналов, см. рис. 6, показывают, что при синхронизации ширина спектральной линии излучения уменьшается. При этом также резко уменьшается долговременная

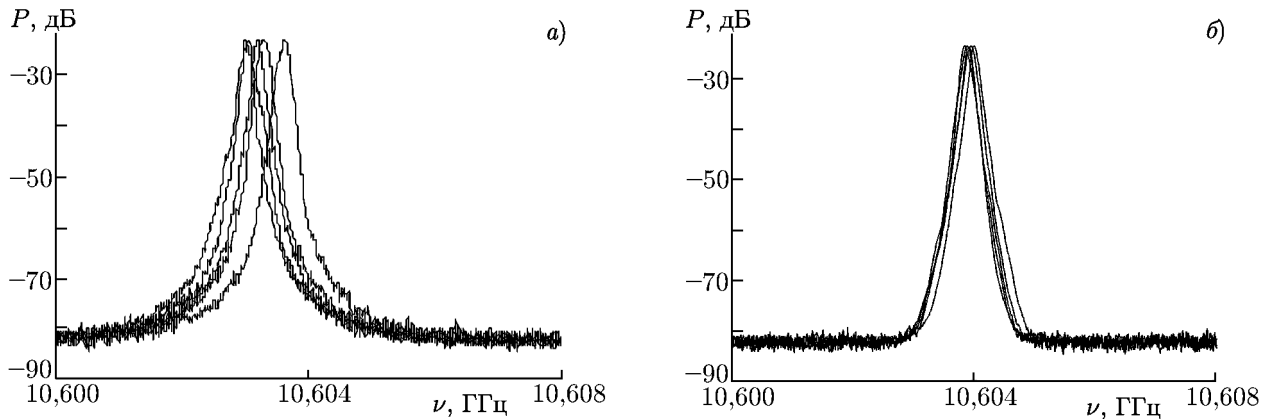


Рис. 6. Спектры сигналов антенн-генераторов в автономном режиме (а) и матрицы антенн-генераторов в режиме синхронизации внешним сигналом (б)

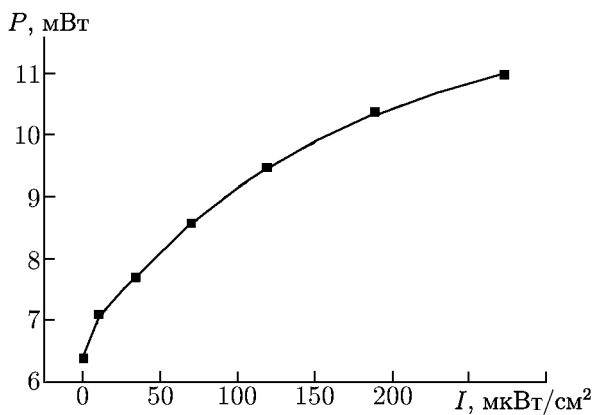


Рис. 7. Увеличение мощности излучения антенны-генератора P при облучении её внешним синхросигналом

нестабильность частоты, и спектральные характеристики антенны-генератора становятся близки к соответствующим параметрам синхросигнала.

Попытка синхронизации внешним сигналом матрицы антенн-генераторов показала, что для захвата и перестройки частоты двух уже взаимно синхронизированных антенн-генераторов требуется значительно большая мощность синхросигнала. Таким образом, при внешней синхронизации взаимосвязь антенн-генераторов через поверхностные волны в подложке является мешающим фактором и для синхронизации большого числа таких устройств, расположенных на одной подложке, необходимо предотвратить распространение в ней поверхностной волны и сделать

источники излучения независимыми.

4. УВЕЛИЧЕНИЕ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННЫ-ГЕНЕРАТОРА ПРИ СИНХРОНИЗАЦИИ ВНЕШНИМ СИГНАЛОМ

Выше уже упоминалось, что при взаимной синхронизации матрицы из двух антенн-генераторов, расположенных на одной подложке, результирующая мощность излучения превышает сумму мощностей излучения отдельных источников. Величину этого превышения оценить трудно, т. к. в результате взаимодействия полей излучения антенн-генераторов сложным образом изменяется ширина и форма диаграммы направленности. При внешней синхронизации форма диаграммы направленности остаётся неизменной, и в точке приёма наблюдается изменение мощности, вызванное только увеличением полной мощности излучения антенны-генератора, что, по-видимому, связано с увеличением КПД, см. рис. 7.

ВЫВОДЫ

1) При расположении нескольких антенн-генераторов на одной диэлектрической подложке за счёт распространяющейся в подложке поверхностной волны происходит их синхронизация, и они излучают на одной, как правило, не совпадающей с исходными, но близкой к ним частоте. Полоса синхронизации составляет порядка 50 МГц, причём при увеличении числа антенн имеется тенденция к её расширению.

2) При работе двух антенн в условиях взаимной синхронизации наблюдается не только суммирование мощностей их излучения, но и повышение эффективности работы каждой из них.

3) При облучении антенны-генератора внешним электромагнитным полем её можно синхронизировать с источником этого поля при мощности последнего много меньшей мощности излучения антенны-генератора. При этом существенно увеличивается КПД генерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любченко В. Е. // Радиотехника. 2002. № 2. С. 16.
2. Gitin M. M., Wise F. W., Arjavalinam G., et al. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1994. V. 42, No. 3. P. 335.
3. Любченко В. Е., Юневич Е. О., Котов В. Д., Калинин В. И. // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 11. С. 1417.
4. Калинин В. И., Котов В. Д., Любченко В. Е., Юневич Е. О. // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 8. С. 1.

Поступила в редакцию 21 апреля 2011 г.; принята в печать 12 августа 2011 г.

SYNCHRONIZATION AND POWER COMBINATION OF MICROSTRIP ANTENNA-COUPLED FIELD-EFFECT TRANSISTOR OSCILLATORS

V. I. Kalinin, V. D. Kotov, V. E. Lyubchenko, and E. O. Yunevich

We study experimentally synchronization and power combining of microwave oscillators containing field-effect transistors as active elements, which are coupled with log-periodic antennas on a dielectric substrate.

The possibility of mutual synchronization of antenna-coupled oscillators located on a common dielectric substrate, which is stipulated by their interaction with the surface wave propagating in the substrate, is demonstrated. The possibility of synchronization of antenna-coupled oscillators by external radiation is also studied. Significant narrowing of the spectrum width and an increase in the oscillation efficiency are found.