

# ВОЛНОВОДНЫЕ И КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ СУММИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ

## ТРЕХМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

М.Ефремова, И.Иванов, Н.Скрипкин

В настоящее время существует потребность в увеличении мощности импульсных генераторов трехмиллиметрового диапазона длин волн в системах радиолокации и радионаблюдения. Одним из вариантов решения задачи может быть применение метода когерентного сложения мощностей синхронизированных магнетронных генераторов. В ранее опубликованных работах [1–5] были представлены результаты экспериментальных исследований подобных устройств в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, которые показали перспективность такого подхода. В данной работе рассматриваются три способа суммирования мощностей синхронизированных магнетронных генераторов трехмиллиметрового диапазона: в электродинамической системе волноводных тройников, в квазиоптическом мосте с выводом на волноводную нагрузку и в квазиоптическом тройнике с выводом энергии в свободное пространство. Экспериментальная проверка этих методов была выполнена на трехканальном модуляторном стенде в ЗАО "РТИ-РАДИО" при участии сотрудников этого предприятия.

### СУММИРОВАНИЕ ТРЕХ МАГНЕТРОНОВ В СИСТЕМЕ ВОЛНОВОДНЫХ ТРОЙНИКОВ

В качестве базовой схемы для суммирования и синхронизации трех магнетронных генераторов была выбрана схема Э.Дейвида [6] на основе волноводов сечением  $2,4 \times 1,2$  мм (рис.1). Данная схема состоит из трех тройников Н-типа и двух тройников Е-типа, связанных между собой отрезками волноводов (порты 1, 2, 3 являются входными, а порты 4, 5, 6, 7 – выходными). С помощью математического моделирования были выполнены расчет и оптимизация геометрических размеров сумматора для работы на частоте входных сигналов используемых генераторов. В результате оптимизации:

- равномерно распределена мощность на выходных портах схемы ( $P_{\text{вых1}} \approx P_{\text{вых2}} \approx P_{\text{вых3}} \approx P_{\text{вых4}}$ , при этом разброс  $\Delta P_{\text{вых}}$  составил не более 5%);

- равномерно распределена отраженная мощность на входных портах схемы ( $P_{\text{отр1}} \approx P_{\text{отр2}} \approx P_{\text{отр3}}$ , при этом разброс  $\Delta P_{\text{отр}}$  составил не более 5% при коэффициенте отражения от синхронизирующего устройства  $\Gamma < -10$  дБ);

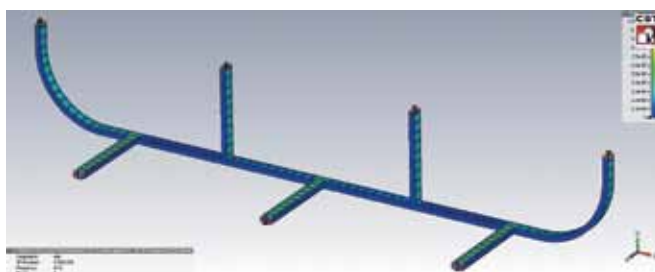


Рис.1. Схема сумматора

- обеспечена необходимая рабочая полоса частот – не менее 200 МГц;
- коэффициент суммирования ( $K_{\text{сум}} = \Sigma P_{\text{вых}} / \Sigma P_{\text{вх}}$ ) составил 0,8;
- получена визуализация распределения полей, позволяющая определить характер процессов в разных частях устройства.



Рис.2. Модулятор с сумматором



Рис.3. Диагностическое оборудование

Экспериментальное исследование сумматора проводилось на трехканальном модуляторе (рис.2, 3). На первом этапе эксперимента были настроены входные каналы сумматора (изменена электрическая длина трактов) для обеспечения максимальной полосы захвата в соответствии с теорией синхронизации [6].

Входные параметры магнетронов:

- импульсная мощность 5,5; 6,2; 5,7 кВт;
- длительность импульса 200 нс;
- частота посылок 2000 Гц;
- собственные частоты магнетронов  $F_0 - 10$  МГц,  $F_0 + 20$  МГц,  $F_0 - 20$  МГц (где  $F_0$  – фиксированная частота трехмиллиметрового диапазона).

В результате эксперимента получены следующие результаты:

- синхронизированная частота:  $F_0$ ;
- суммарная импульсная мощность по четырем каналам: 13,8 кВт;
- неравномерность распределения мощности по каналам: около 5%;
- длительность выходного импульса: 200 нс;
- полоса "захвата": 40 МГц;

- коэффициент суммирования: 0,79;
- максимальная полоса: около 100 МГц.

В ходе эксперимента были сняты осциллограммы ВЧ-оглабающей в несинхронном и синхронном режимах (рис.4), а также спектрограмма несинхронного и синхронного сигналов одного из каналов (рис.5). В процессе экспериментов два выходных канала направлялись на рупорные излучатели и складывались на двухмерной поглощающей мишени на расстоянии около 0,5 м от излучателя. Регистрация интерференционной картины производилась тепловизором FLIR (рис.6). Полученное изображение подтвердило когерентность работы системы.

В результате экспериментальных работ подтверждена работоспособность данного способа суммирования синхронизированных генераторов. В дальнейшем этот способ предполагается использовать в составе приемно-передающего модуля локатора высокого уровня мощности с фазированной антенной решеткой. В настоящее время в компании "РТИ-РАДИО" идет подготовка к модельному эксперименту такой системы.

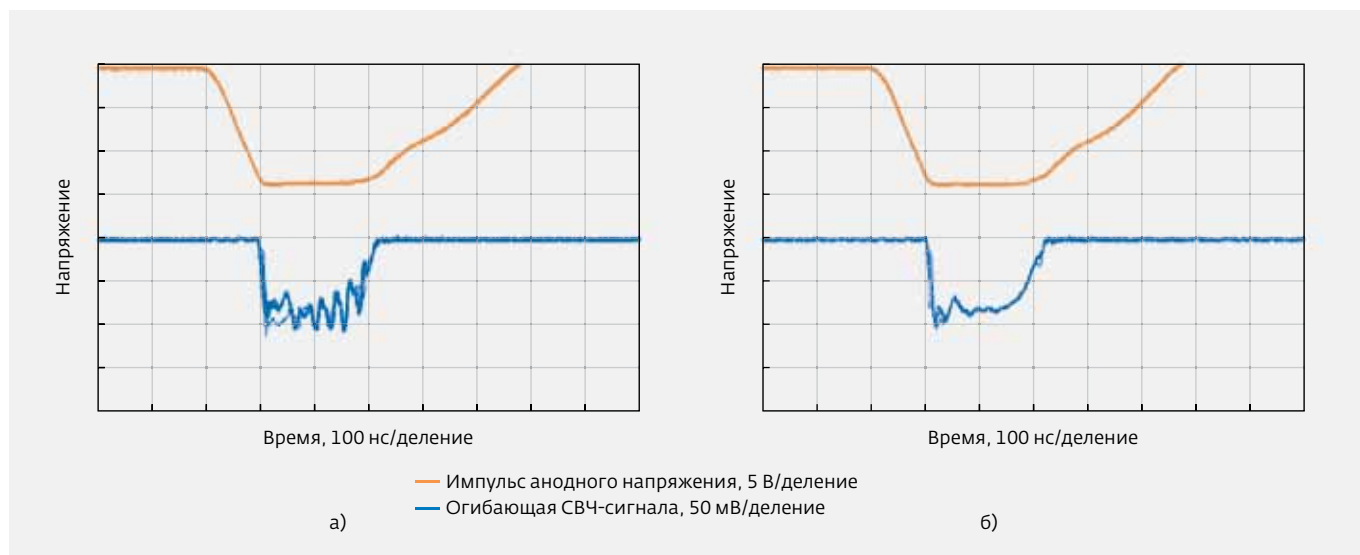


Рис.4. Огибающие СВЧ-сигнала в несинхронном (а) и синхронном (б) режимах

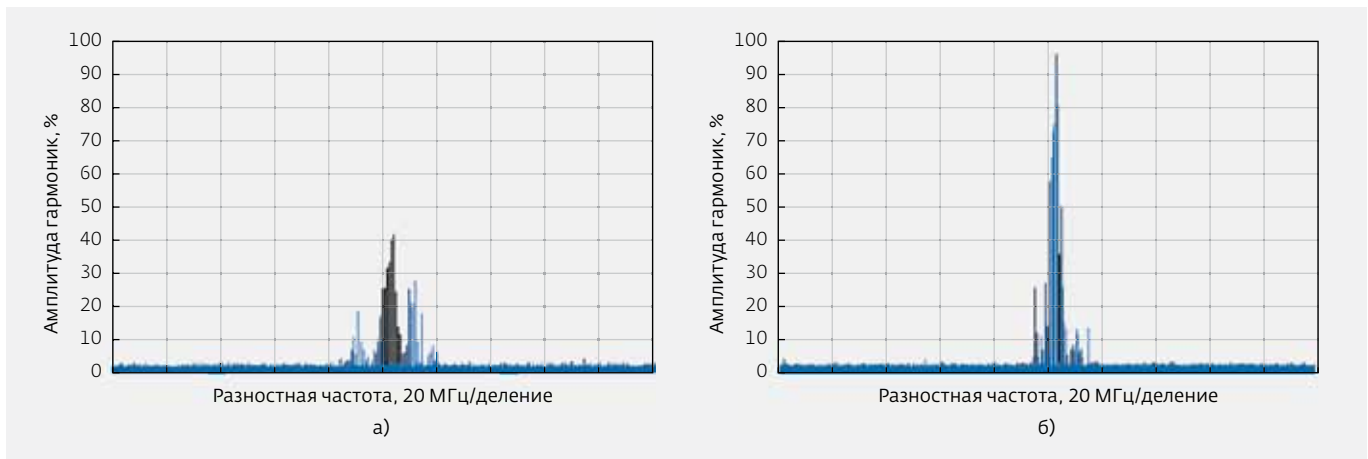


Рис.5. Спектрограмма несинхронного (а) и синхронного (б) сигналов (частота с учетом гетеродина)

### СУММИРОВАНИЕ И УСИЛЕНИЕ В КВАЗИОПТИЧЕСКОМ МОСТЕ

В дальнейших экспериментах был использован балансный смеситель в виде трехдецибелного моста. Идея использования подобных устройств изложена в работах 60-х годов прошлого века [7, 8]. В трехмиллиметровом диапазоне классические волноводные мосты имеют крайне малые размеры отверстий связи, и электрическая прочность подобных устройств недостаточна для работы с киловаттными уровнями импульсной мощности. Поэтому было решено использовать квазиоптические принципы формирования суммированного сигнала, для чего разработали квазиоптический мост\* со следующими параметрами:

- рабочая частота: F0;
- рабочая полоса частот: не менее 800 МГц;
- импульсная мощность входных сигналов: не более 10 кВт;
- максимальная импульсная мощность в выходном плече: 30 кВт;
- направленность: 20 дБ;
- переходное ослабление:  $4 \pm 1$  дБ.

Принцип работы моста основан на эффекте Тальбота в сверхразмерном волноводе. Плоский сверхразмерный волновод возбуждается на входе двумя плоскими рупорами и имеет на выходе такие же плоские рупоры. Мгновенное распределение электрического поля в модели моста получено методом математического моделирования (рис.7).

Один рупор на входе (1 на рис.7) моста возбуждает первую и вторую моды колебаний, удовлетворяющих граничному условию отсутствия излучения в другом входном рупоре. Моды распространяются с различными

фазовыми скоростями. Разница в волновых числах равна:

$$\Delta k = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} - \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2}, \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны в вакууме,  $a$  – ширина плоского волновода. Длина волновода  $L$  подбирается из условия равенства набега фаз  $90^\circ$ :

$$\Delta k \cdot L = \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

Приближенно условие (2) можно представить в виде:

$$L = \frac{1}{3} \frac{2a^2}{\lambda}, \quad \left(\frac{\lambda}{a}\right)^2 \ll 1. \quad (3)$$

Отметим, что величина  $L$  соответствует части длины Тальбота ( $a$  – период оптической системы):

$$Z_T = \frac{\lambda}{1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{a^2}}} \approx \frac{2a^2}{\lambda}, \quad \left(\frac{\lambda}{a}\right)^2 \ll 1. \quad (4)$$



Рис.6. Интерференционная картина на экране тепловизора

\* Квазиоптический мост разработан сотрудниками ОАО "Гиком" и ИПФ РАН Г.Г.Денисовым и М.Ю.Шмелевым.



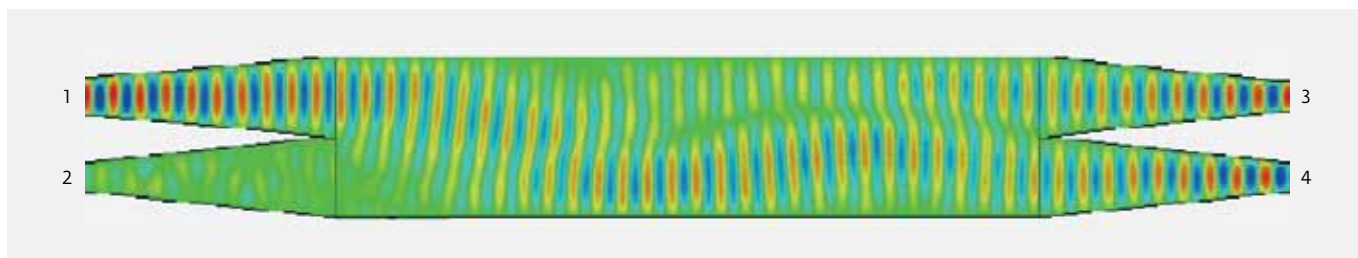


Рис.7. Мгновенное распределение поля в объеме моста при питании с двух входов (3 и 4) со сложением в одном выходном рупоре (1)

Если выполнено условие (2), то в каждый выходной рупор (3 и 4 на рис.7) войдет волна от обеих мод со сдвигом  $90^\circ$ . Соответственно, в обратном случае, когда на входе оба рупора (3 и 4 на рис.7) запитаны генераторами со сдвигом  $90^\circ$ , на выходе оба излучения сложатся в одном рупоре (1 на рис.7). Ортогональность двух излучений на входе – неперемное условие возбуждения обеих мод.

### САМОСИНХРОНИЗАЦИЯ ДВУХ МАГНЕТРОНОВ ПРИ РАБОТЕ НА ОБЩУЮ НАГРУЗКУ

Эксперимент по синхронизации двух магнетронов на квазиоптическом мосту был проведен по схеме, аналогичной описанной в [4] (рис.8). Взаимная фазировка двух магнетронов обеспечивалась фазосдвигателем, согласование со стороны плеча 2 – короткозамыкающим поршнем (см. рис. 8). Рабочие частоты двух магнетронов составляли  $F_0 - 25$  МГц и  $F_0 + 30$  МГц ( $F_0$  – частота синхронизированных магнетронов). Мощность каждого магнетрона на согласованную нагрузку – 4,2 кВт и 5,1 кВт, соответственно. Длительность импульса СВЧ-генерации 200 нс. Посредством перемещения поршня суммированный сигнал направлялся на вход прибора горячих измерений (ПГИ) путем подбора положения поршня обеспечивался максимальный коэффициент суммирования  $K_{\text{сум}} = 0,9$  ( $P_{\text{сум}} = 8,4$  кВт) на частоте  $F_0$ . При перемещении поршня на расстояние, превышающее  $0,1 \lambda_v$  (где

$\lambda_v$  – длина волны в волноводе) от оптимального значения, происходила рассинхронизация магнетронов. При этом каждый из них начинал работать на собственной частоте. В синхронном и несинхронном режимах были сняты спектрограммы и огибающие СВЧ-сигнала (рис.9, 10).

Максимальная полоса частоты суммирования при фазовом ограничении  $\Delta\phi = 90^\circ$  составила  $\Delta F = 60$  МГц. Высокий коэффициент суммирования квазиоптических мостов по данной схеме может быть использован в практических устройствах суммирования.

### РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ КВАЗИОПТИЧЕСКОГО МОСТА

Синхронизация колебательных процессов возможна в двух режимах – самосинхронизации и синхронизации внешним сигналом. В последнем случае источник внешнего сигнала не имеет обратной связи с синхронизируемыми генераторами, то есть внешняя частота как бы "навязывается". Если вместо короткозамыкающего поршня (см. рис.8а) к квазиоптическому мосту подключить источник входного сигнала (входной магнетрон) с аттенуатором и ферритовым вентилем, то схема приобретает свойства регенеративного усилителя. Такое устройство было предложено И.В.Лебедевым в начале 60-х годов 20 века [7]. В дальнейшем в работе О.Б.Бецкого и Э.М.Гутцайта были выполнены расчетные и экспериментальные исследования аналогичного устройства в трехсантиметровом диапазоне длин волн [8].

В рамках данной работы проведены эксперименты по созданию регенеративного усилителя в трехмиллиметровом диапазоне. Исследовались режимы захвата частоты в зависимости от мощности и частоты внешнего сигнала и получена спектрограмма выходного сигнала (рис.11).

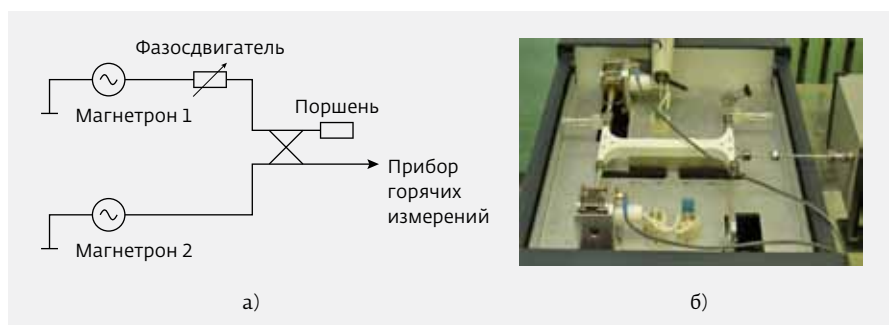


Рис.8. Эксперимент по синхронизации двух магнетронов: а) схема проведения эксперимента; б) внешний вид установки

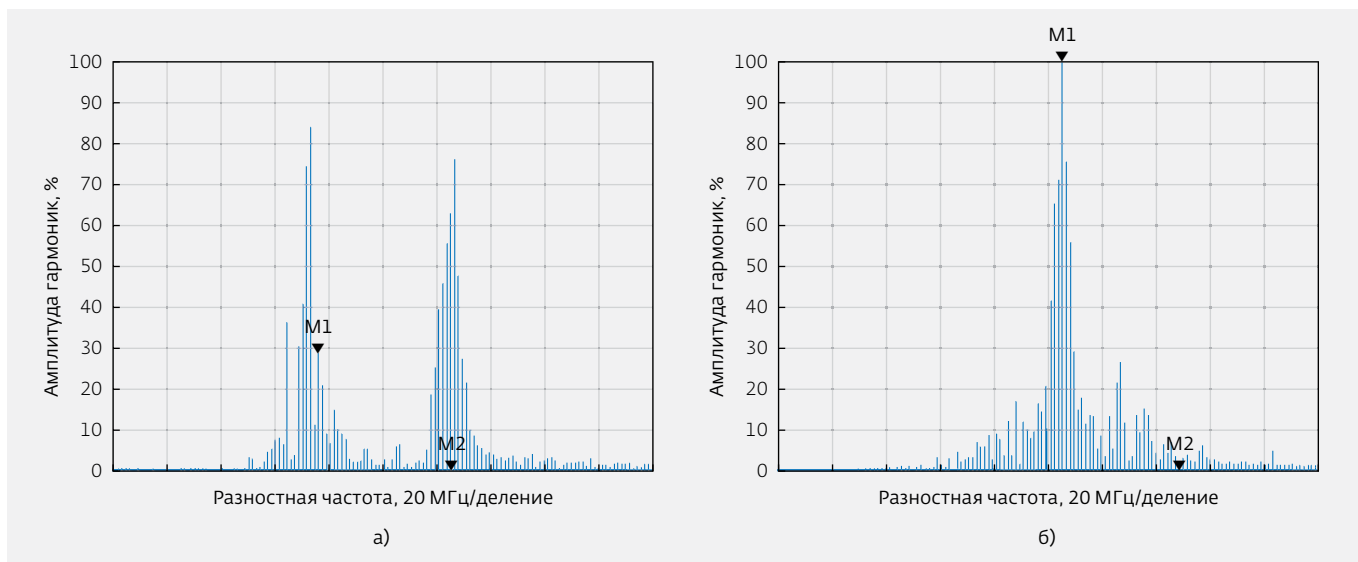


Рис.9. Спектрограммы несинхронного (а) и синхронного (б) режимов

Входные параметры эксперимента:

- импульсная мощность выходных магнетронов (M1, M2): 5,5; 5,7 кВт;
- собственные частоты выходных магнетронов:  $F_0-10$  МГц;  $F_0-30$  МГц;
- основная частота входного магнетрона:  $F_0$ ;
- диапазон регулировки входной мощности: 0,5–2 кВт;
- диапазон регулировки входной частоты:  $\pm 20$  МГц.

Результаты эксперимента:

- достигнута устойчивая работа двух магнетронов в квазиоптическом мосте в режиме синхронизации внешним сигналом;

- максимальный коэффициент усиления при полосе захвата  $\Delta F = 30$  МГц составил около 10 дБ;
- максимальная мощность на выходе усилителя составила 8,1 кВт;
- определена зависимость ширины полосы захвата от входного сигнала, при этом максимальная ширина полосы наблюдалась при коэффициенте усиления около 6 дБ;
- максимальная ширина полосы перестройки входного сигнала (полоса захвата) составила 50 МГц;
- отмечено, что устройство сохраняет работоспособность при выключении одного из выходных

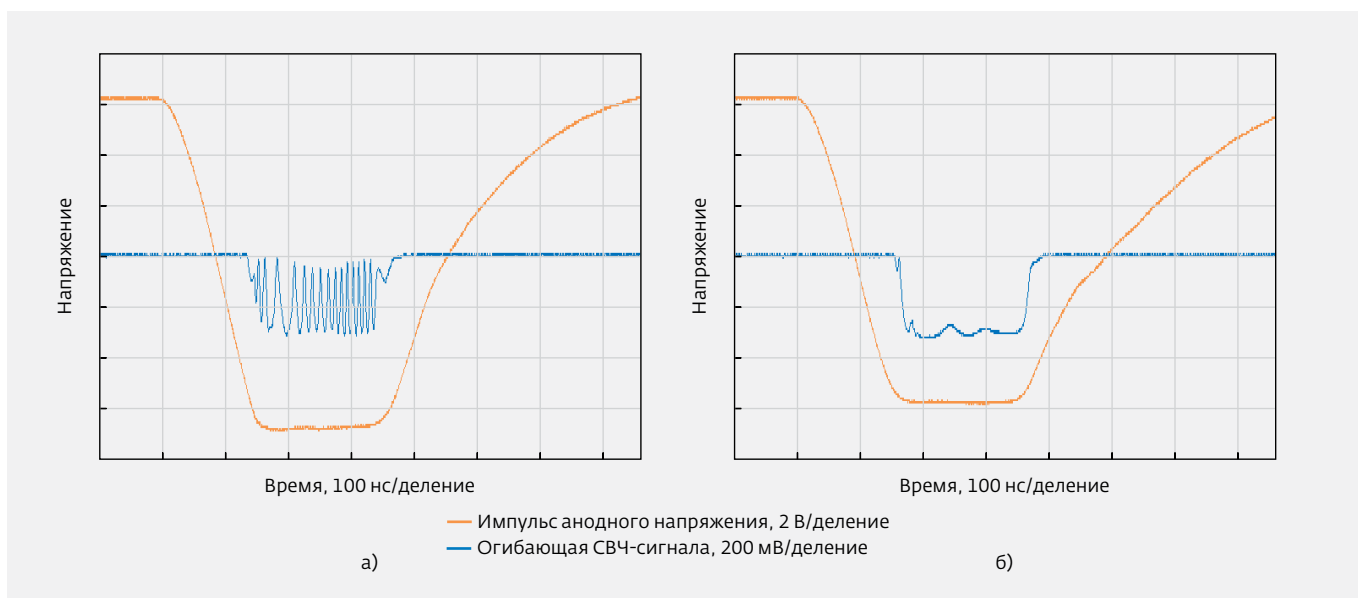


Рис.10. Огибающие СВЧ-сигнала в несинхронном (а) и синхронном режиме (б)

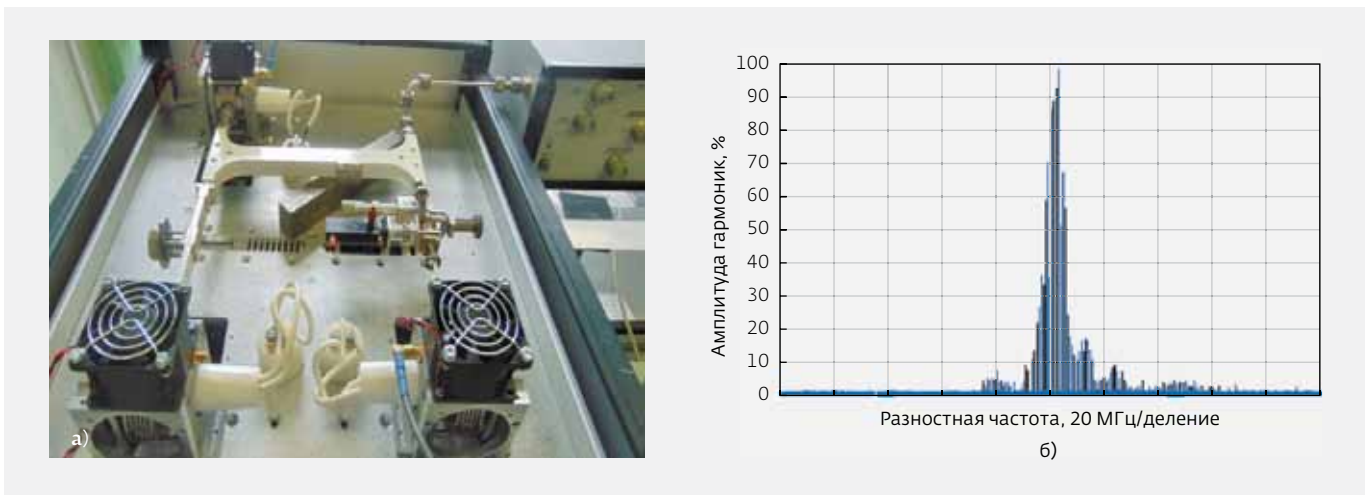


Рис.11. Исследование регенеративного усилителя: а) внешний вид установки; б) спектрограмма выходного сигнала

магнетронов, при этом коэффициент усиления уменьшается на 3 дБ.

### СУММИРОВАНИЕ НА КВАЗИОПТИЧЕСКОМ ТРОЙНИКЕ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В процессе исследований по самосинхронизации генераторов трехмиллиметрового диапазона в свободном пространстве был предложен способ суммирования на квазиоптическом тройнике в виде проводящей призмы с двумя полированными сопряженными гранями, на которые падает излучение от двух рупорных излучателей одинаково поляризованных генераторов (магнетронов) (рис.12). К достоинствам систем такого типа относятся высокая электрическая прочность, возможность регулировки мощности

без применения волноводных аттенюаторов и возможность фазирования без применения фазовращателей. При этом требуются хорошая юстировка системы и формирование пучков излучения с малой расходимостью.

Результаты экспериментальной проверки показали возможность получения высокого коэффициента суммирования даже без оптимизации расходимости пучков излучения. Полоса синхронизации составила около 100 МГц. Настройка системы осуществлялась путем плавного перемещения одного из магнетронов вместе с рупорным излучателем по направлению к призме. Характер ВЧ-огibaющей и спектрограммы сигналов в целом соответствовали несинхронному и синхронному режимам, описанным выше.

Данная схема перспективна для применения при конструировании многоканальных сумматоров высокого и сверхвысокого уровня мощности. Следует отметить, что в зависимости от поляризации излучения устройство соответствует Е- или Н-тройнику. При этом угол между двумя гранями призмы может изменяться в зависимости от компоновочных схем.

\* \* \*

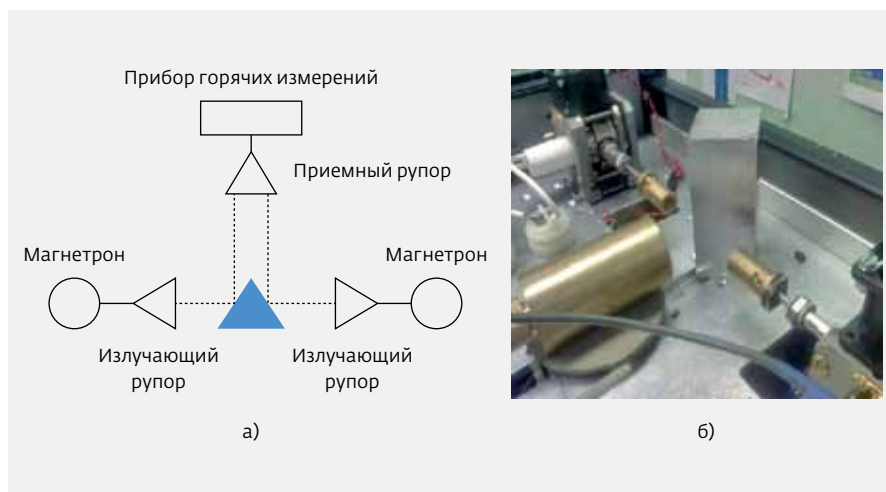


Рис.12. Эксперимент по суммированию на квазиоптическом тройнике в виде проводящей призмы: а) схема проведения эксперимента; б) внешний вид установки

Представленные в работе результаты пригодны для практического применения в различных устройствах СВЧ-техники трехмиллиметрового диапазона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Егоров Ю., Иванов И., Артамонов В., Юсупов У.** Устройство сложения мощностей генераторов на магнетронах. Патент РФ № 2394357.
2. **Иванов И.** Сложение мощностей при синхронизации импульсных магнетронов миллиметрового диапазон // Технологии информационного общества. 2013. № 10. С. 53–55.
3. **Иванов И., Курушин А.** Синхронизация магнетронов с выводом энергии в свободное пространство // Современная электроника. 2013. № 7.
4. **Иванов И., Петюшин Н., Скрипкин Н.** Сумматор мощности магнетронов 3-миллиметрового диапазона длин волн // Научные технологии. 2014. № 11.
5. **Боев С., Вагин А., Иванов И. и др.** Экспериментальное исследование самосинхронизации магнетронов трехмиллиметрового диапазона // Научные технологии. 2015. № 5.
6. **Дейвид Э.** Фазирование высокочастотными сигналами / Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями / Пер. под ред. М.Федорова. – ИЛ, 2, 1961, с. 327.
7. **Лебедев И.** Балансный усилитель СВЧ. – Авторское свидетельство № 25550 с приоритетом от 1 июня 1962 г.
8. **Бецкий О., Гутцайт Э.** Балансный регенеративный усилитель СВЧ // Радиотехника и электроника. 1966. № 4. С. 709–720.

## НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 975 руб.

## МОЩНЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ-УСИЛИТЕЛИ

Сечи Ф., Буджатти М.

При поддержке АО "НПП «Исток» им. Шокина"

Перевод с англ. под ред. д.т.н. А.А.Борисова

В книге рассмотрены все традиционные вопросы, связанные с разработкой усилителей мощности, начиная от получения моделей приборов на большом сигнале и заканчивая обсуждением сумматоров мощности и методов проектирования.

Большое внимание в издании уделено рассмотрению физических основ приборов, фазовых шумов, схем смещения и тепловому проектированию. Также в книге особое внимание уделяется рассмотрению фундаментальных принципов. Издание затрагивает необычайно большое количество областей, связанных с физикой полупроводников и активных устройств.

Книга представляет интерес для специалистов, которые занимаются разработкой усилителей мощности для базовых станций сотовой связи. В особенности это относится к рассмотрению моделей на больших сигналах, проблем, связанных с фазовыми шумами, методов проектирования усилителей мощности, специальных конструкций усилителей мощности и теплового проектирования. Также данная книга может послужить в качестве справочного пособия при углубленном изучении СВЧ-устройств.

М: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 416 с.  
ISBN 978-5-94836-415-5

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; ✉ [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)