

Физическая аппаратура

УДК 537.868

Формирование мощных наносекундных импульсов с помощью высокочастотных генераторов непрерывного действия

В. И. Каганов

Рассмотрен способ формирования периодической последовательности наносекундных импульсов путем преобразования энергии непрерывных высокочастотных колебаний, распространяющихся по коаксиальной линии. Данный метод аналогичен синхронизации мод лазерного излучения в оптическом диапазоне. Проведено компьютерное моделирование предлагаемого способа, и рассмотрена возможная схема его технической реализации.

PACS: 84.30.Ng

Ключевые слова: наносекундный импульс, высокочастотный генератор, синхронизация, фидерная линия, ряд Фурье.

Введение

Наносекундные импульсы повышенной мощности используются в импульсной энергетике и электронике для формирования сильных и сверхсильных магнитных полей в интересах изучения влияния последних на физико-химические свойства различных веществ, а также для очистки воды, формирования материалов с новыми свойствами и для ряда других важных приложений [1—5].

Установка по генерации наносекундных импульсов обычно состоит из трех основных частей: высоковольтного источника постоянного напряжения или тока, накопителя электрической энергии емкостного или индуктивного типа, а также в виде искусственной линии и ключей, рассчитанных на коммутацию громадных токов [2, 4, 5]. В подобных установках генерация одиночных импульсов осуществляется путем относительно длительного времени накопления электрической энергии и ее последующего быстрого разряда посредством коммутации электрической цепи.

В оптическом диапазоне, помимо данного способа формирования коротких импульсов, применяется также метод одновременного возбуждения в резонаторе лазера большого числа мод непрерывных колебаний, преобразуемых при выполнении

определенных условий в импульсы весьма малой длительности и повышенной пиковой мощности [6, 7]. Поскольку в основе такого способа лежит необходимость синхронизации мод в общем резонаторе, то он и получил соответствующее название.

Рассмотрим возможность распространения метода синхронизации мод лазерного излучения на формирование периодической последовательности наносекундных импульсов в радиотехническом диапазоне, заменив только моды на гармоники высокочастотного колебания, а резонатор — на общую фидерную линию. Определим, при выполнении каких условий возможно такое преобразование энергии непрерывных высокочастотных колебаний в энергию импульсов.

Исходные соотношения

Разложим в ряд Фурье периодическую последовательность прямоугольных импульсов, описываемых функцией:

$$\Phi(t) = 0,5U_0 [\text{sign}(y(t)) + 1], \quad (1)$$

$$\text{где } y(t) = \left(\cos\left(2\pi\frac{t}{T}\right) - \cos\left(\pi\frac{\tau}{T}\right) \right);$$

T — период следования импульсов;

τ — длительность импульса.

Пример графика функции (1) при $T = 0,1$ мс и $\tau = 1$ нс построен на рис. 1, а. Здесь t — время в мс.

Приведем известные соотношения, необходимые для дальнейшего анализа [8]. Коэффициенты ряда Фурье:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi(t) dt, \quad A_k = \frac{2}{T} \int_0^T \Phi(t) \cos\left(2\pi k \frac{t}{T}\right) dt. \quad (2)$$

Каганов Вильям Ильич, профессор.

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА). Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78. Тел. 8 (495) 932-62-17. E-mail: Kaganovwil@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 12 июня 2012 г.

© Каганов В. И., 2012

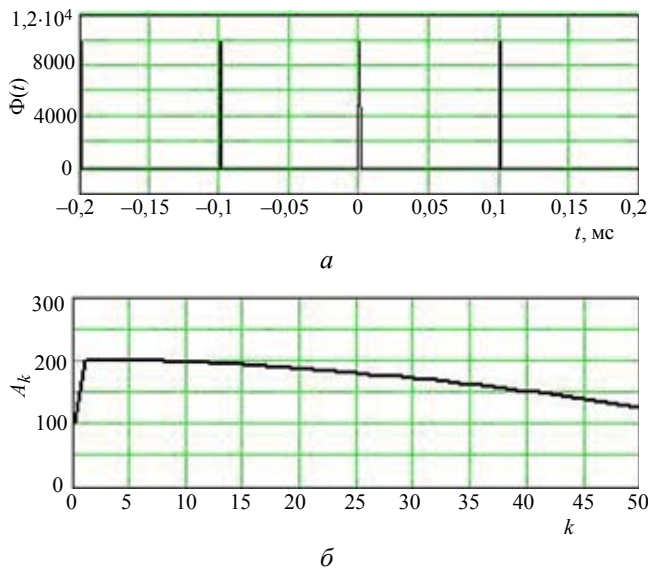


Рис. 1. Периодическая последовательность наносекундных импульсов (а) и значения амплитуды гармоник непрерывных колебаний такой последовательности (б)

График коэффициентов A_k , определяющих амплитуду гармоник для случая, приведенного на рис. 1, а, построен на рис. 1, б.

Средняя мощность сигнала $\Phi(t)$ за период T :

$$P_T = \frac{1}{T} \int_0^T [\Phi(t)]^2 dt / R, \quad (3)$$

где R — сопротивление нагрузки.

Мощность одного импульса сигнала $\Phi(t)$ длительностью τ :

$$P_\tau = \frac{1}{\tau} \int_{-0,5\tau}^{0,5\tau} [\Phi(t)]^2 dt / R, \quad (4)$$

Синтезируем сигнал, суммируя только N гармоник исходного колебания $\Phi(t)$:

$$S(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos\left(2\pi k \frac{t}{T}\right). \quad (5)$$

Для исходного сигнала $\Phi(t)$, приведенного на рис. 1, а, график сигнала $S(t)$ при $N = 50$ построен на рис. 2, а, б; при $N = 25$ — на рис. 2, в, г, где опять t — время в мс.

Мощность сигнала $S(t)$ за период T — сумма мощностей N гармоник исходного сигнала $\Phi(t)$:

$$P_G = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (A_k)^2 / R. \quad (6)$$

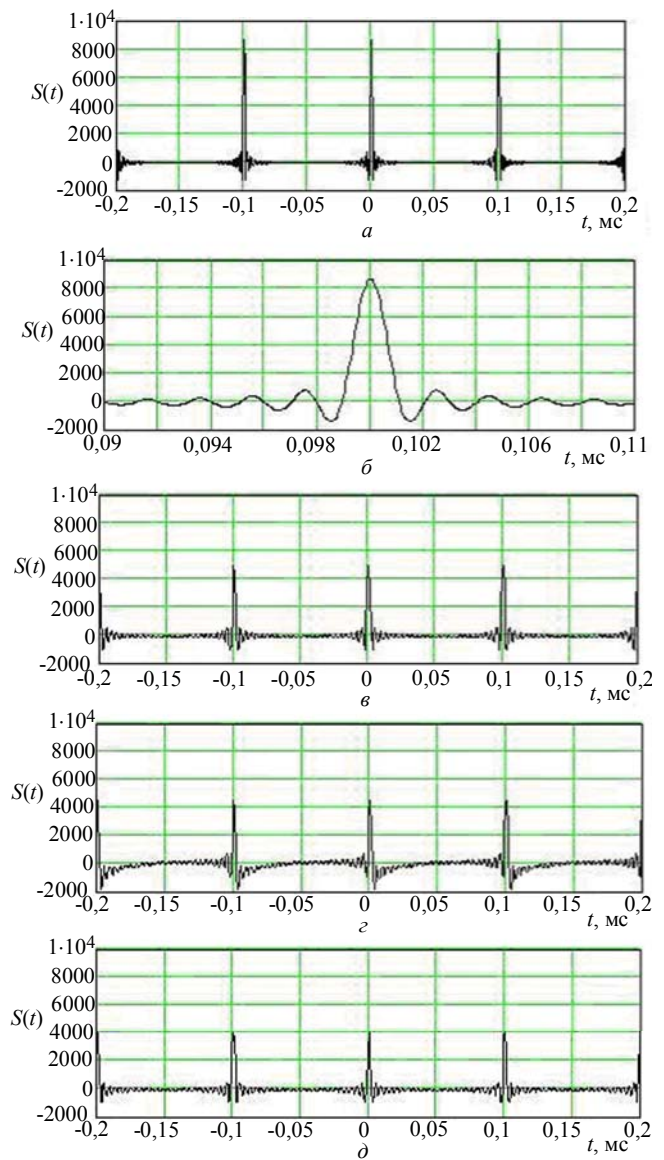


Рис. 2. Синтезированная периодическая последовательность импульсов при $N = 50$ (а, б) и при $N = 25$ (в, г, д)

Мощность одного импульса сигнала $S(t)$:

$$P_I = \frac{1}{\tau_i} \int_{-0,5\tau_i}^{0,5\tau_i} [S(t)]^2 dt / R, \quad (7)$$

где τ_i — длительность сформированного импульса.

Мощности сигналов $\Phi(t)$ и $S(t)$, рассчитанные согласно формулам (3)—(7) при нагрузке $R = 10$ Ом, амплитуде $U_0 = 10\,000$ В, $T = 0,1$ мс, $\tau = 1$ нс и двух значениях N , приведены в таблице.

N	P_T , кВт	P_τ , кВт	P_G , кВт	P_I , кВт	P_I/P_G	T , мс	τ , нс	τ_i , нс
25	100	10^4	46,5	1800	39	0,1	1	4
50	100	10^4	77,0	5700	74	0,1	1	2,2

Таким образом, согласно данным рис. 2 и таблицы, с помощью N непрерывных сигналов, связанных между собой определенными соотношениями, полученными при разложении в ряд Фурье периодической последовательности прямоугольных импульсов, можно синтезировать короткие импульсы с импульсной мощностью P_I . В зависимости от числа учитываемых гармоник N и скважности $q = T/\tau$ импульсная мощность P_I может значительно превышать сумму мощностей непрерывных сигналов P_G . В рассматриваемом примере при исходной скважности $q = 100$ и заданной длительности импульса $\tau = 1$ нс мощность в импульсе P_I превышает суммарную мощность непрерывных колебаний P_G в 39 раз при $N = 25$ и в 74 раза при $N = 50$. При этом, однако, происходит некоторое расширение длительности реального импульса, в рассмотренном примере, соответственно, до 4 и 2,2 нс.

Усилитель бегущей волны

Одним из практических способов суммирования мощностей сигналов генераторов непрерывных колебаний может служить схема усилителя бегущей волны (рис. 3, а).

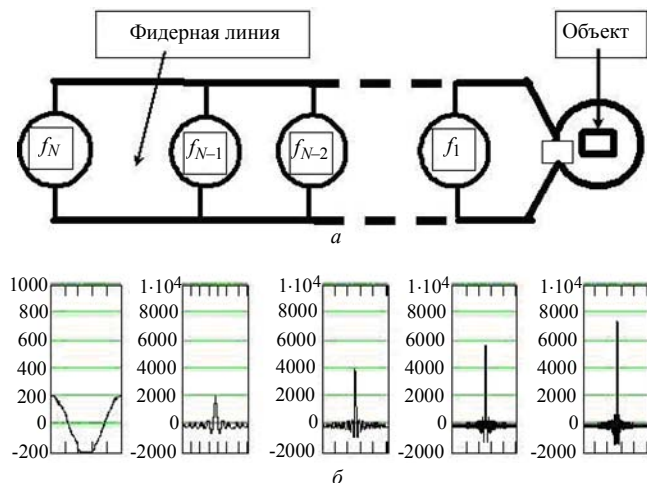


Рис. 3. Схема усилителя бегущей волны (а) и фрагмент волны, бегущей по фидерной линии, после 1-, 10-, 20-, 30- и 40-го генераторов (б)

В рассматриваемом случае в этой схеме к общей бездисперсионной фидерной линии через определенные промежутки l_k подключается N генераторов с частотой $f_1 = 1/T, f_2 = 2f_1, f_3 = 3f_1, \dots, f_N = Nf_1$ и амплитудой, определяемой согласно (2).

В рассматриваемом примере значения частот генераторов: $f_1 = 10$ МГц, $f_2 = 20$ МГц, ..., $f_{25} = 250$ МГц, ..., $f_{50} = 500$ МГц, а амплитуды определяются по графику, приведенному на рис. 1, б. Для

соблюдения фазовых соотношений между отдельными колебаниями длина l_k должна быть такой, чтобы в ней укладывалось целое число волн генератора, подключенного на входе данного отрезка, что позволяет записать:

$$l_k = \frac{cT}{k\sqrt{\epsilon}}, \tag{8}$$

где c — скорость света;

ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость материала, заполняющего фидерную линию.

Общая длина линии составит:

$$l = \sum_{k=1}^N \left(\frac{cT}{k\sqrt{\epsilon}} \right). \tag{9}$$

В рассматриваемом примере при $N = 25, T = 0,1$ мс, $\epsilon = 9$ получим $l_k = 10/k$, размерность в м. Таким образом, длина 1-го отрезка линии $l_1 = 10$ м, 2-го — $l_2 = 5$ м, 3-го — $l_3 = 2,5$ м и т. д., а общая длина фидерной линии $l = 38,16$ м.

Волна, распространяющаяся по фидерной линии от генератора к генератору, претерпевает следующие изменения: увеличивается по амплитуде и сжимается, приближаясь к исходному импульсу. Вид фрагмента волны после 1-, 10-, 20-, 30- и 40-го генераторов для рассматриваемого примера приведен на рис. 3, б. При нарушении амплитудных и фазовых соотношений волна претерпевает изменения. Так, в рассматриваемом примере при добавлении к каждому колебанию синтезируемого сигнала $S(t)$ фазовой ошибки вида $\pi/2k$ сигнал примет вид, показанный на рис. 2, з, а при равенстве всех амплитуд колебания $A_k = 0,8 A_1$ — вид, показанный на рис. 2, д.

Обобщая полученный результат, приходим к выводу, что с помощью усилителя бегущей волны мощность в импульсе может превысить суммарную мощность генераторов непрерывных колебаний ориентировочно в $0,5q$ раз. При этом, что важно, не требуется никакой коммутации электрических цепей с высокими напряжениями и большими токами.

Техническая реализация

Возможная структура устройства по реализации предложенного способа формирования периодической последовательности мощных наносекундных импульсов приведена на рис. 4. Входящий в структуру синтезатор служит для

формирования стабильной сетки частот $f_k = k f_1 = k/T$, где k — целое число от 1 до N . Синхронизатор служит для точной синхронизации фаз суммируемых сигналов генераторов. В качестве фидерной линии может быть выбрана коаксиальная линия с волновым сопротивлением ρ , близким к сопротивлению нагрузки R . В рассмотренном примере при нагрузке в 10 Ом для отношения диаметров внешнего и внутреннего цилиндров коаксиальной линии при $\epsilon = 9$ получается значение, равное 1,65. При увеличении скважности и снижении сопротивления нагрузки и, соответственно, волнового сопротивления линии можно получить еще большее увеличение импульсной мощности вплоть до 1 ГВт, по сравнению с рассмотренным примером в 74 МВт.

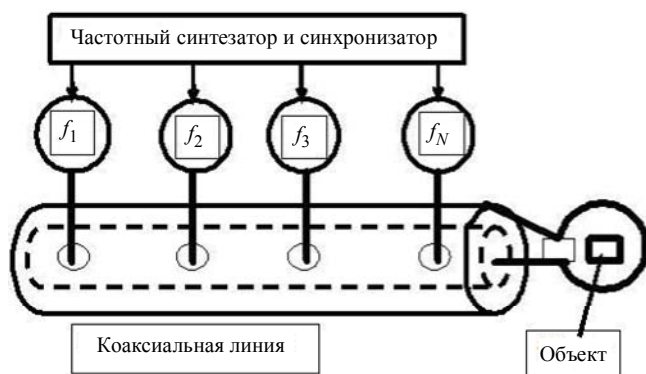


Рис. 4. Структурная схема установки по формированию периодической последовательности импульсов с помощью генераторов непрерывного действия

Другая структура устройства кругового типа, более экономная в конструктивном отношении, приведена на рис. 5, где $\Gamma\Phi_k$ — генератор частотой f_k с последовательно с ним включенным полосно-пропускающим фильтром, настроенным на ту же частоту f_k . В схеме рис. 5 те же генераторы, что и на рис. 4, располагаются по кругу, в центре которого размещена общая нагрузка. Для соблюдения условия фазирования суммируемых колебаний в общей нагрузке длина фидерной линии l_k от генератора до нагрузки определяется согласно (8).

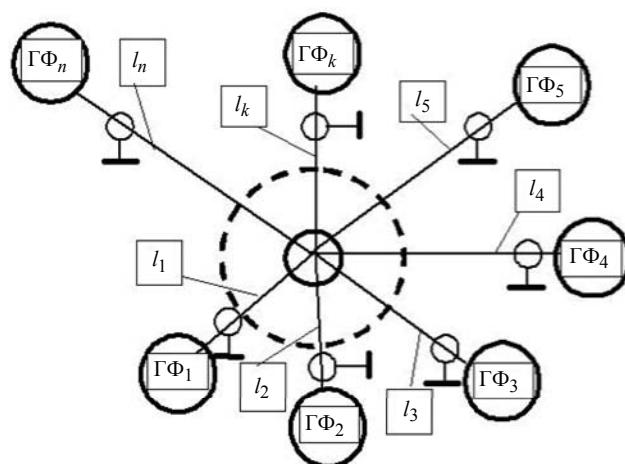


Рис. 5. Генератор кругового типа:
 $\Gamma\Phi_k$ — генератор частотой f_k ; l_k — длина фидерной линии

Заключение

Проведенное компьютерное моделирование подтверждает теоретические основы способа формирования периодической последовательности мощных наносекундных импульсов путем преобразования энергии непрерывных высокочастотных колебаний с помощью усилителя бегущей волны. При этом пиковая мощность импульса может быть в 50 и более раз больше суммарной мощности генераторов непрерывных колебаний и достигнуть одного и более ГВт. Метод аналогичен методу синхронизации мод лазера в общем резонаторе.

Литература

1. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. — М.: Мир, 2004.
2. Месяц Г. А., Пепель И. В. Введение в импульсную энергетика и электроника. — М.: ФИАН, 2009.
3. Херлах Ф. Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применение. — М.: Мир, 1988.
4. Белкин В. С., Бухарин В. А., Дубровин В. К. и др. Наносекундные электромагнитные импульсы и их применение. — г. Челябинск: Лурье, 2001.
5. Лагутин А. С., Ожогин В. И. Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Orazio Svelto. Principles of Lasers. — М.: Lan, 2008.
7. Кондиденко И. И., Коротков П. А., Хиженяк А. И. Физика лазеров. — К.: Вица школа, 1984.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1976.

Formation of powerful nanosecond impulses by means of high-frequency generators of continuous action

V. I. Kaganov

Moscow State Technical University of Radio Engineering, Electronics and Automation (MIREA)
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia
E-mail: Kaganovwil@yandex.ru

The way of formation of periodic sequence of nanosecond impulses by transformation of energy of the continuous high-frequency fluctuations extending on the coaxial line is considered. This method is similar to synchronization of fashions of the laser in an optical range. Computer modeling of an offered way is carried out and the possible scheme of its technical realization is considered.

PACS: 84.30.Ng

Keywords: nanosecond impulse, high-frequency generator, synchronization, feeding line, Fourier series.

Bibliography — 8 references.

Received June 12, 2012