

## ФАЗОВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ НАНОСЕКУНДНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ГАННА

© 2011 г. В. Ю. Конев, В. П. Губанов, А. И. Климов, О. Б. Ковальчук,  
В. В. Ростов, К. А. Шарыпов\*, М. И. Яландин\*

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3  
E-mail: klimov@lfe.hcei.tsc.ru*

*\*Институт электрофизики УрО РАН  
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106  
E-mail: yalandin@iep.uran.ru*

Поступила в редакцию 24.04.2011 г.

Исследована синхронизация фазы с.в.ч.-колебаний двух наносекундных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона с пиковой мощностью 20 Вт. Фаза фиксировалась фронтом импульса напряжения от общего модулятора на каждом из генераторных диодов. Показано, что стандартное отклонение разности фаз снижается при увеличении скорости нарастания напряжения до момента начала генерации и может составлять порядка 0.1 рад, что на шкале времени соответствует 1–2 пс.

Наносекундные генераторы на диодах Ганна могут эффективно использоваться в системах ближней радиолокации с высоким разрешением по дальности [1]. Исследование возможности стабилизации фазы их с.в.ч.-импульсов представляет интерес для повышения потенциала радиолокационной системы за счет более эффективной обработки принимаемых сигналов, а также для построения активных фазированных антенных решеток.

Среди различных способов фиксации фазы с.в.ч.-колебаний наносекундных генераторов Ганна особый интерес представляет способ, использованный в работах [2–5] с генераторами Ганна трехсантиметрового диапазона милливаттной мощности. Этот способ фазовой синхронизации пары электродинамически не связанных генераторов обеспечивается импульсом напряжения с достаточно крутым фронтом, подаваемым на генераторные диоды параллельно от общего источника модулирующих импульсов [5]. Отмечалось, что для фиксации фазы с.в.ч.-излучения длительность фронта импульса напряжения питания на генераторных диодах должна быть сравнима с периодом колебаний, т.е. быть порядка 100 пс [2].

В данной работе описаны результаты экспериментального исследования синхронизации фазы с.в.ч.-колебаний двух наносекундных генераторов трехсантиметрового диапазона с пиковой мощностью до 20 Вт, питающихся параллельно от одного модулятора, фронт нарастания напряжения которого мог регулироваться в некоторых пределах в условиях, когда его длительность существенно превышает период колебаний.

Схема измерений приведена на рис. 1. Генераторы на диодах Ганна 3А762 были подключены к модулятору посредством полосковых линий геометрической длиной 51 см и волновым сопротивлением 6 Ом на основе фольгированного стеклотекстолита. Модулятор был собран по схеме с частичным разрядом емкости. Амплитуда импульсов напряжения регулировалась чип-резисторами, включенными последовательно между полосковыми линиями и генераторными диодами. Импульсы регистрировались осциллографом Tektronix TDS5104B, имеющим рабочую полосу 1 ГГц, с использованием пробников с рабочей полосой 500 МГц. Устройство с.в.ч.-блоков генераторов и электрическая схема модулятора аналогичны описанным в работе [6].

Достигнутая в экспериментах максимальная скорость нарастания напряжения до момента возникновения с.в.ч.-генерации  $dU/dt$  (рис. 2) на фронте формируемого электрического импульса обеспечивалась в случае, когда модулятор был дополнен схемой обострения фронта на основе диода с накоплением заряда, описанной в [7]. Для уменьшения величины  $dU/dt$  между модулятором и входами полосковых линий подключалась чип-индуктивность  $L = 10$  или  $18$  нГн. Частота следования импульсов равнялась 5 кГц.

Генераторы настраивались на несущую частоту  $f_0$  волноводным полосковым перестраиваемым фильтром [6] с полосой пропускания 40 МГц. Для наблюдения огибающей с.в.ч.-сигналы детектировались с помощью волноводных детекторов на основе электровакуумного с.в.ч.-диоода 6Д16Д [8, 9]. Выходные сигналы соответствовали режиму квадратичного детектирования. Эксперименты проводились на двух частотах  $f_0 = 9.75$  и  $10$  ГГц.

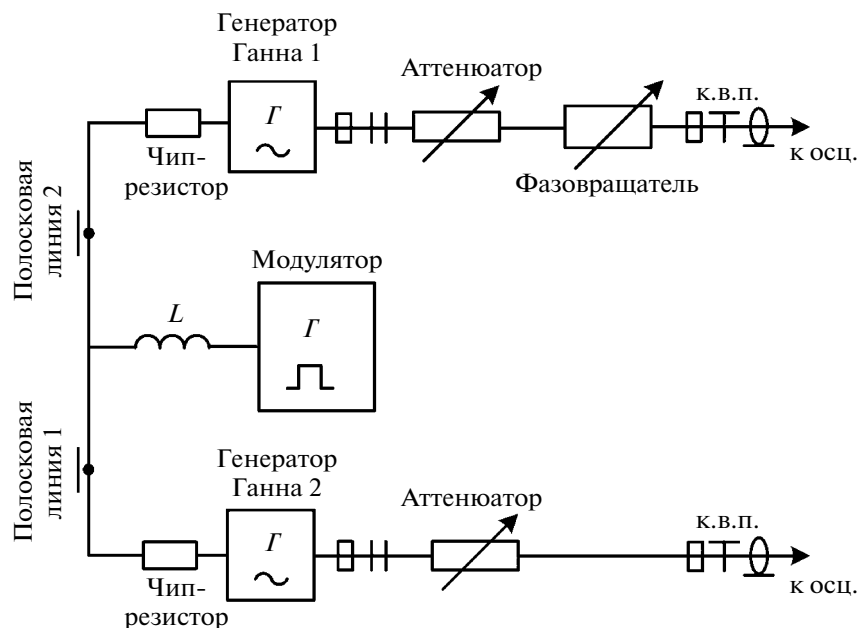


Рис. 1. Схема фазовых измерений.

Схемы и методы измерений были аналогичны тем, которые использовались в работе [10]. Методом временных интервалов выполнялись измерения стандартного отклонения  $\sigma_\varphi$  фиксированной фазы  $\varphi$  с.в.ч.-колебаний каждого из генераторов относительно фронта импульса напряжения модулятора, а также стандартного отклонения  $\sigma_{\delta\varphi}$  разности фаз  $\delta\varphi$  с.в.ч.-колебаний генераторов. Выход каждого из с.в.ч.-генераторов был подключен к измерительному каналу на основе стандартного волновода сечением  $23 \times 10 \text{ мм}^2$ . В один из каналов был включен фазовращатель, позволявший сдвигать фазу волны относительно фазы

волны в другом канале. В каналах с.в.ч.-сигналы выравнивались по амплитуде переменными аттенюаторами Д5-1.

Измерения выполнялись цифровым запоминающим осциллографом Tektronix TDS6154C с аналоговой полосой 15 ГГц и периодом дискретизации 25 пс. Каждый из сигналов с помощью стандартного коаксиально-волноводного перехода (к.в.п.) и широкополосного коаксиального кабеля SFT304 фирмы Times MicroWave подавался на отдельный канал. Для получения амплитуды сигнала, приемлемой для измерений, в кабельных линиях использовались широкополосные коаксиальные аттенюаторы фирм Radiall и Barth Electronics.

Стандартные отклонения  $\sigma_\varphi$  и  $\sigma_{\delta\varphi}$  определялись по измеренным осциллографом TDS6154C стандартным отклонениям соответствующих временных задержек  $\sigma_t$  и  $\sigma_{\delta t}$  с использованием соотношений:  $\sigma_\varphi = 2\pi\sigma_t/T$ ,  $\sigma_{\delta\varphi} = 2\pi\sigma_{\delta t}/T$ , где  $T$  – период колебаний. Кроме того, стандартное отклонение разности фаз с.в.ч.-колебаний генераторов  $\sigma_{\delta\varphi}$  определялось из измерений стандартного отклонения  $\sigma_{U_{s0}}$  амплитуды их суммарного радиосигнала  $U_{s0}$ . Для этого к выходам волноводных каналов подключался двойной волноводный тройник и сигнал с его выхода через к.в.п. и коаксиальный кабель подавался на осциллограф TDS6154C. При этом предполагалось, что величина  $\sigma_{U_{s0}}$  определяется, в основном, разбросом  $\delta\varphi$ , а флуктуации амплитуды  $U_0$  в каналах от импульса к импульсу малы и незначительно влияют на результаты измерений [10].

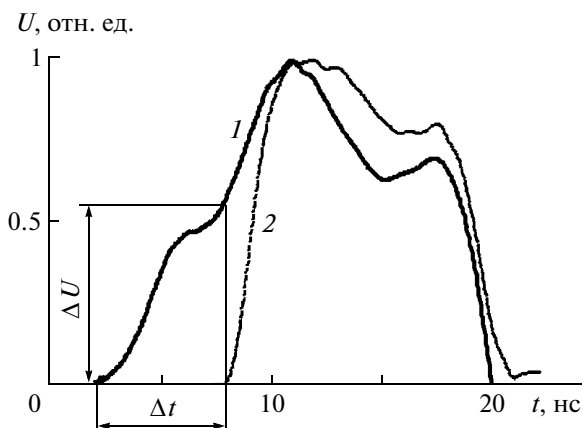


Рис. 2. Осциллограммы сигналов на выходе полосковых линий (1) и с.в.ч.-импульса (2), зарегистрированные осциллографом TDS5104B с пробниками с рабочей полосой 500 МГц,  $\Delta U/\Delta t = dU/dt$ .

Измерения разброса амплитуды суммарного радиосигнала выполнялись в режиме, когда  $\langle \delta\varphi \rangle \approx \pi/2$  и  $\langle U_{S0} \rangle \approx 2^{1/2} \langle U_0 \rangle$ . Необходимая разность фаз устанавливалась с помощью волноводного фазовращателя. Для оценки разброса разности фаз радиосигналов использовалось соотношение

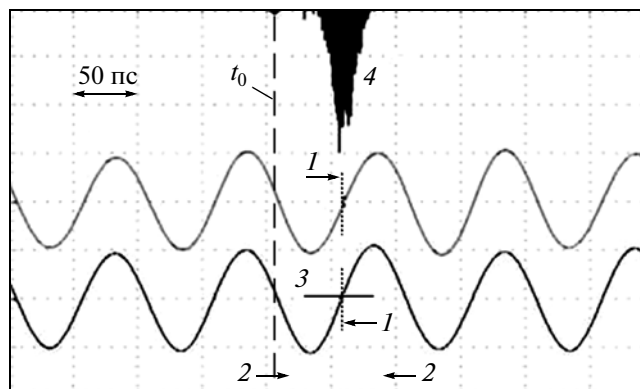
$$\sigma_{\delta\varphi} \approx \frac{\sqrt{2}\sigma_{U_{S0}}}{\langle U_0 \rangle} \approx \frac{2\sigma_{U_{S0}}}{\langle U_{S0} \rangle}.$$

Измерения разброса суммарного детектированного радиосигнала в режиме  $\langle \delta\varphi \rangle \approx \pi/2$  выполнялись, кроме того, с подключением с.в.ч.-детектора к выходу двойного волноводного тройника. Детектированный сигнал измерялся осциллографом TDS5104B. Для статистической обработки сигналов использовалось выражение для разности фаз с.в.ч.-импульсов генераторов в отдельной реализации

$$\delta\varphi^{(i)} \approx \frac{\pi}{2} + \left( 1 - \frac{P_{S0}^{(i)}}{2\langle P_0 \rangle} \right),$$

где  $\langle P_0 \rangle$  – усредненная по статистической выборке амплитуда мощности в каждом канале. Амплитуда мощности суммарного сигнала  $P_{S0}^{(i)}$ , усредненного по статистической выборке, при этом равна  $\langle P_{S0} \rangle \approx 2\langle P_0 \rangle$  [10].

Во всех описанных случаях осциллографы запускались по фиксированному уровню на крутом участке фронта импульса напряжения. На рис. 3 представлены осциллограммы радиосигналов обоих каналов, зарегистрированные осциллографом TDS6154C в случае, когда методом временных интервалов измерялась величина  $\sigma_{\delta t}$ . Генераторы были настроены на частоту  $f_0 = 10$  ГГц. Для выборки из 1000 импульсов в этом случае стандартное отклонение временной задержки  $\sigma_t$  фик-



**Рис. 3.** Осциллограммы (синусоиды) с.в.ч.-колебаний генераторов Ганна, зарегистрированные осциллографом Tektronix TDS6154C: 1 – стрелки-указатели, соответствующие нулевому уровню сигнала, по которому измерялась временная задержка  $\delta t$  между сигналами; 2 – стрелки-указатели заданного временного интервала, фиксирующего период колебаний, в котором выполнялось измерение  $\delta t$ ; 3 – прямоугольная область минимальной высоты 3 мВ и шириной 50 пс для фиксации точек нижней синусоиды для построения гистограммы 4 распределения сигналов по задержкам  $t$  относительно момента времени  $t_0$  запуска осциллографа.

сированной фазы с.в.ч.-колебаний каждого из генераторов относительно фронта импульса питающего напряжения, измеренное также методом временных интервалов, лежало в пределах 8.4–8.5 пс ( $\sigma_\varphi = 0.52$  рад). На рис. 3 для примера показана гистограмма распределения импульсов для фиксированной фазы с.в.ч.-колебаний одного из сигналов по временной задержке  $t$  относительно момента времени  $t_0$  запуска осциллографа. Условия экспериментов и остальные результаты приведены в таблице. В первом столбце таблицы указаны методы измерений в хронологическом порядке

Результаты измерений разброса разности фаз с.в.ч.-колебаний генераторов Ганна

Метод измерений; выборка	$dU/dt$ , В/нс	Амплитуда напряжения на диоде Ганна $U$ , В	Чип-индуктивность $L$ , нГн	Чип-резистор $R$ , Ом	Несущая частота $f_0$ , ГГц	$\sigma_{\delta\varphi}$ , рад
Временные интервалы; 1000	14.2	110	0	4.7	10	0.1
Разброс амплитуды суммарного радиосигнала; 100	14.2	110	0	4.7	10	0.1
Разброс амплитуды суммарного детектированного сигнала; 500	11.8	110	0	4.7	9.75	0.08
					10	0.11
	9.3	105	10	4.7	9.75	0.10
					10	0.16
					6.6	0.18
7.2	105	18	1.5	10	0.21	

их описания, а также количество регистрируемых импульсов для статистических расчетов. Обращает на себя внимание то, что величина  $\sigma_{\delta\varphi}$  существенно меньше величины  $\sigma_{\varphi}$ . Увеличение  $dU/dt$  в 1.8 раза, с 6.6 до 11.8 В/нс, привело к уменьшению  $\sigma_{\delta\varphi}$  в 2.3 раза. Дальнейшее увеличение  $dU/dt$  с 11.8 до 14.2 В/нс существенно не повлияло на изменение величины  $\sigma_{\delta\varphi}$ .

Этот результат может, по-видимому, объясняться достигнутой погрешностью настройки генераторов и их рабочим режимом, а не ограничениями, связанными с использованными методами и средствами измерений. В методе временных интервалов в соответствии с техническим описанием осциллографа оценка погрешности величин  $\sigma_t$  и  $\sigma_{\delta t}$  применительно к условиям выполняемых измерений составляла около 1 пс, что позволяет измерить величину  $\sigma_{\delta\varphi}$ , равную 0.1 рад.

Погрешности измерения величины  $\sigma_{\delta\varphi}$  методами разброса амплитуды суммарного радиосигнала и разброса амплитуды суммарного детектированного сигнала обуславливались соответственно нестабильностью амплитуды  $\delta U_0$  и мощности  $\delta P_0$  сигнала отдельного генератора от импульса к импульсу и шума цифровых осциллографов, используемых в экспериментах. Эти методы позволяют измерить величину  $\sigma_{\delta\varphi}$ , равную 0.04 рад.

С целью определения влияния нестабильности несущей частоты  $\delta f_0$  с.в.ч.-колебаний на величину  $\sigma_{\delta\varphi}$  была определена величина  $\sigma_{\delta f_0}$  отдельного генератора от импульса к импульсу. Измерения  $\delta f_0$  выполнялись при  $dU/dt \approx 14.2$  В/нс с помощью метода полосового перестраиваемого фильтра, описанного в [6]. По результатам измерений нестабильность от импульса к импульсу несущей частоты характеризовалась среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{\delta f_0} = 0.6-0.8$  МГц.

Составляющая нестабильности фазы с.в.ч.-колебаний одного генератора, возникающая вследствие нестабильности несущей частоты, определяется соотношением  $\delta\varphi_1 = 2\pi\tau\delta f_0$ , где  $\tau = 10$  нс – длительность импульса с.в.ч.-излучения. Для указанной нестабильности несущей частоты разброс фазы с.в.ч.-колебаний отдельного генератора характеризуется величиной  $\delta\varphi_1 = 0.04-0.05$  рад, а нестабильность разности фаз с.в.ч.-колебаний двух генераторов может соответствовать оценке  $\delta\varphi = 1.41\delta\varphi_1 = 0.06-0.07$  рад и с учетом некоторой возможной нестабильности начальной фазы колебаний каждого генератора соответствует вышеприведенным результатам прямых измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты №№ 08-02-12019-офи, № 09-08-99006-р\_офи и 11-02-00097-а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадулин Н.Н., Бацула А.П., Губанов В.П. и др. // ПТЭ. 1998. № 6. С. 111.
2. Введенский В.Ю., Андриянов А.В., Ермилов Э.А. // ПТЭ. 1975. № 1. С. 114.
3. Введенский В.Ю., Сюваткин В.С. // РЭ. 1981. № 3. С. 664.
4. Введенский В.Ю., Зуев А.Б., Каримбаев Д.Д. и др. // ПТЭ. 1985. № 3. С. 123.
5. Введенский В.Ю., Сюваткин В.С., Хрусталева А.А. // РЭ. 1985. № 10. С. 2063.
6. Губанов В.П., Климов А.И., Ковальчук О.Б. и др. // ПТЭ. 2010. № 5. С.95.
7. Зуенко С.И. // ПТЭ. 1984. № 4. С. 100.
8. Klimov A.I., Kovalchuk O.B., Rostov V.V., Sinyakov A.N. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. № 6. P. 661.
9. Климов А.И. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 98.
10. Ельчанинов А.А., Климов А.И., Ковальчук О.Б. и др. // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 1. С. 125.