

Для цитирования: Флеров А. Н., Флерова А. А. Система автоматической синхронизации временного положения излучаемых сигналов импульсной фазированной антенной решетки субнаносекундного диапазона // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 6. С. 65–72.
DOI 10.21778/2218-5453-2019-6-65-72
УДК 621.396.677

А. Н. Флеров¹, А. А. Флерова¹

¹ БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИЗЛУЧАЕМЫХ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ СУБНАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

В статье представлена структура импульсной фазированной антенной решетки (ИФАР) субнаносекундного диапазона с системой автоматической синхронизации (САС) временного положения излучаемых сверхширокополосных (СШП) импульсов. Рассмотрены аспекты реализации составных частей САС. Особое внимание уделено реализации временного дискриминатора. Доказана возможность создания временного дискриминатора САС субнаносекундного диапазона в виде бинарного временного компаратора на базе быстродействующего D-триггера КМОП-серии. Показано, что при наличии джиттера выходного импульса генератора нелинейная модель системы автоматической стабилизации параметра с характеристикой дискриминатора релейного типа сводится к линейной модели, позволяющей достаточно просто определить основные параметры и характеристики САС. Результаты приведенного анализа подтверждены лабораторными и стендовыми испытаниями элементов САС и макетных образцов ИФАР.

Ключевые слова: генерация СШП-импульсов, временная пространственная синхронизация, система автоматической стабилизации параметра, временной дискриминатор

Введение

Импульсная фазированная антенная решетка (ИФАР) с отдельными активными антенными модулями имеет ряд значительных преимуществ по сравнению с другими системами генерации и излучения мощных СШП-импульсов, а именно: высокий КПД, устойчивость к электрическому пробое в элементах антенно-фидерного тракта, возможность электронного сканирования лучом диаграммы направленности [1–5].

Чтобы реализовать в субнаносекундном диапазоне преимущества такого типа ИФАР, необходимо осуществлять автоматическую пространственную синхронизацию импульсов, излучаемых отдельными антенными модулями (АМ). Длительность излучаемых АМ импульсов в десятки раз меньше времени задержки распространения сигналов в каналах ИФАР. Вследствие температурного дрейфа канальных задержек происходит рассогласование временного положения излучаемых импульсов относительно друг друга, при этом диапазон разброса задержек в каналах ИФАР

соизмерим с длительностью излучаемых импульсов, что приводит к значительному уменьшению интенсивности пространственного суммарного сигнала. На рис. 1а показана структурная схема ИФАР субнаносекундного диапазона. Рис. 1б иллюстрирует влияние разброса канальных задержек на интенсивность суммарного излученного импульса.

Структурная схема ИФАР

ИФАР субнаносекундного диапазона (рис. 1а) содержит синхрогенератор (СХГ), включающий генератор ($G_{\text{т0}}$) и распределитель импульсов запуска антенных модулей (сплиттер), а также N АМ. В сплиттер входят временные модуляторы, предназначенные для начальной временной юстировки каналов и осуществления сканирования диаграммы направленности. В АМ входят: синхронизатор, генератор высоковольтных СШП-импульсов (G_i) и антенна (A_i). Синхронизатор АМ содержит временной модулятор (ВМ), сглаживающий фильтр (Z) и временной дискриминатор (ВД).

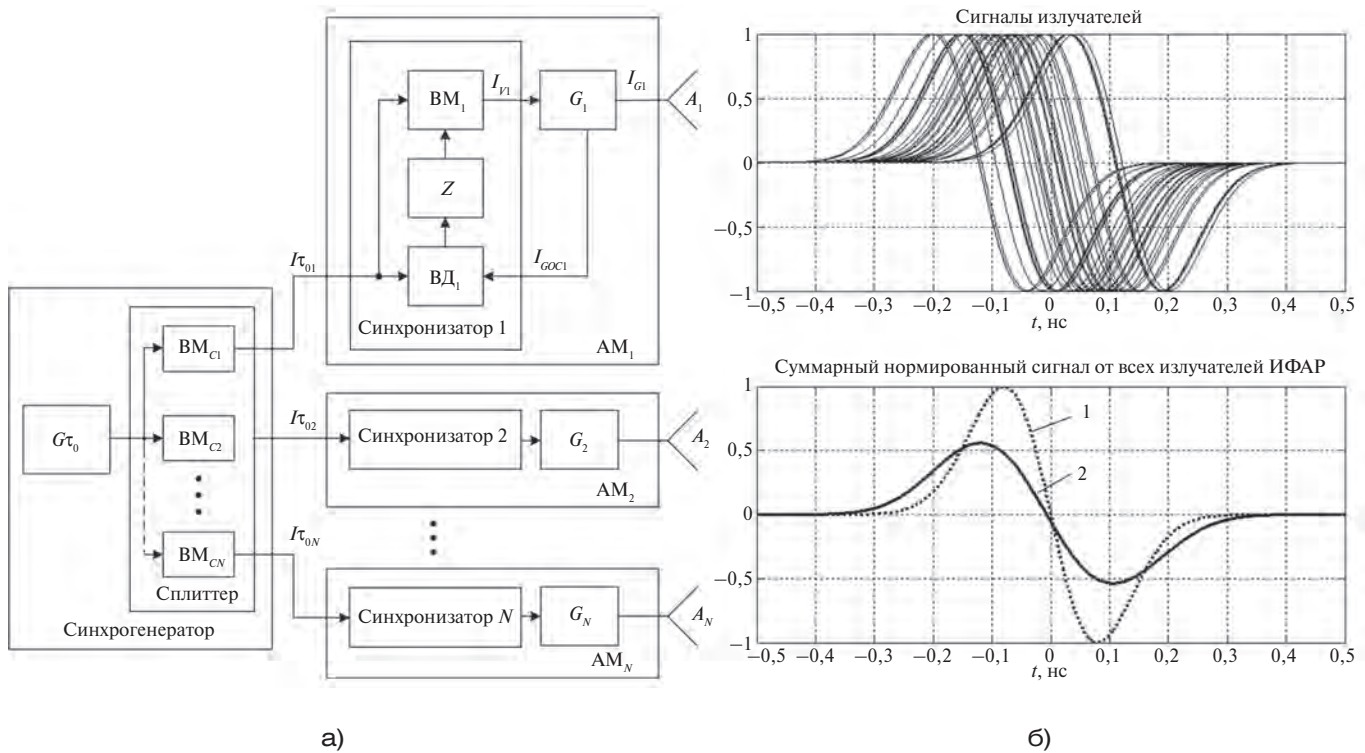


Рисунок 1. Импульсная фазированная антенная решетка субнаносекундного диапазона: а – структурная схема; б – совокупность сигналов излучателей и суммарный нормированный пространственный сигнал при длительности импульсов излучения $\tau_{\text{и}} \approx 500$ нс, разбросе канальных задержек 250 нс и равномерном законе распределения (1 – синфазное излучение, 2 – суммарный сигнал)

Структурная схема САС

Синтез структуры системы синхронизации канала ИФАР базируется на результатах теории оптимальных измерителей оценки временного положения сигнала [6–9].

Синхронизатор АМ представляет собой систему автоматической стабилизации временного положения излучаемого генератором импульса относительно эталонного момента времени, общего для всех АМ.

Эталонным воздействием для САС является формируемый СХГ высокостабильный по длительности импульс (I_{τ_0}). Для того чтобы осуществить эффективное суммирование пространственных сигналов, в каждом канале АМ задержка сигнала модулятора (VM_i) должна меняться в соответствии с законом изменения задержки выходного импульса (I_{G_i}) канального генератора (G_i).

В [10] показано, что для стабилизации временного положения излучаемых антеннами ИФАР-импульсов должно выполняться следующее условие:

$$\tau_{G_i}(t) + \tau_{V_i}(t) = \tau_0 = \text{const}, \quad (1)$$

где τ_0 – длительность импульса опорного интервала (I_{τ_0}) синхрогенератора; $\tau_{G_i}(t)$ – медленно флуктуирующая задержка выходного импульса генератора относительно импульса запуска генератора;

$\tau_{V_i}(t)$ – задержка выходного импульса временного модулятора относительно фронта импульса опорного интервала.

В связи с многообразием известных вариантов реализации отдельных функциональных узлов САС, их комбинаций и с учетом особенностей работы этих узлов в наносекундном и субнаносекундном диапазонах в значительной степени применялся эвристический подход.

Реализация временных модуляторов не встречает затруднений, так как в наносекундном диапазоне при требуемой регулируемой задержке в единицы и десятки наносекунд их схемотехника хорошо отработана, например, с использованием диодов с накоплением заряда (ДНЗ). Также не вызывает трудностей реализация аналоговых или цифровых сглаживающих цепей (Z).

При построении САС субнаносекундного диапазона возникают значительные трудности с реализацией временного дискриминатора. На выбор варианта схемной реализации временного дискриминатора влияют следующие факторы:

- форма и длительность сигнала, поступающего от объекта управления (в данном случае – генератора) и форма сигнала эталонного воздействия (импульс опорного интервала синхронизатора),

целесообразность их трансформации, так как преобразования сигналов в дополнительных функциональных устройствах приводят к их искажению и увеличению инструментальной погрешности измерения;

- удобство согласования выхода временного дискриминатора с последующими функциональными узлами – усиления и фильтрации сигнала рассогласования;
- элементная база, пригодная для работы в субнаносекундном диапазоне.

Известны следующие основные типы временных дискриминаторов, успешно применяемых в микросекундном диапазоне:

- аналоговые ключевые дискриминаторы с накоплением заряда на емкости с одним или несколькими селекторными импульсами, осуществляющие амплитудное различение или различение по площади участков сигнала;
- цифроаналоговые дискриминаторы, у которых сигналы нормируются по длительности и амплитуде, сравниваются с применением схемы совпадения и с последующим интегрированием результата;
- цифровые эквиваленты аналогового временного дискриминатора, у которых величина временного рассогласования преобразуется в число импульсов, поступающих от отдельного тактового генератора, с последующим накоплением с учетом знака рассогласования реверсивным счетчиком (интегратором).

В субнаносекундном диапазоне реализация аналоговых и цифроаналоговых временных дискриминаторов практически невозможна. Трудности возникают при формировании коротких стробов субнаносекундной длительности. Реализация

цифровых дискриминаторов также практически невозможна из-за сверхвысокой тактовой частоты генератора и необходимости сверхвысокого быстродействия реверсивного счетчика – интегратора.

Предельным вариантом цифрового временного дискриминатора является бинарный временной компаратор, выходное напряжение которого является функцией знака временного рассогласования сигналов:

$$U_{ВД}(t) = U_m \text{sign}[\Delta\tau_{\text{ош}}(t)], \quad (2)$$

где $\Delta\tau_{\text{ош}}$ – временное рассогласование сигналов на входах дискриминатора; U_m – амплитуда выходных сигналов дискриминатора. Как показали исследования и лабораторные испытания [10], такой вариант построения дискриминатора работоспособен в субнаносекундном диапазоне и крайне прост в реализации.

Бинарный временной компаратор (БВК) имеет дискриминационную характеристику релейного типа [7]. Структурная схема САС одного канала ИФАР с бинарным временным компаратором представлена на рис. 2а.

Генератор АМ на рис. 2а охвачен петлей отрицательной обратной связи, содержащей БВК с характеристикой релейного типа, цепь сглаживания (ФНЧ – аналоговый или цифровой интегратор) и временной модулятор, регулировочная характеристика которого близка к линейной.

На сигнальный вход БВК поступает импульс опорного интервала (I_{τ_0}), а на опорный вход – прошедший через пиковый детектор, ослабленный attenuатором сигнал (I_{Goc1}) гауссовой формы в случае резистивного attenuатора или формы моноцикла Гаусса в случае емкостного дифференцирующего attenuатора. Функция пикового детектора – расширение импульса обратной связи для обеспечения необходимого заряда переключения вентиля временного компаратора.

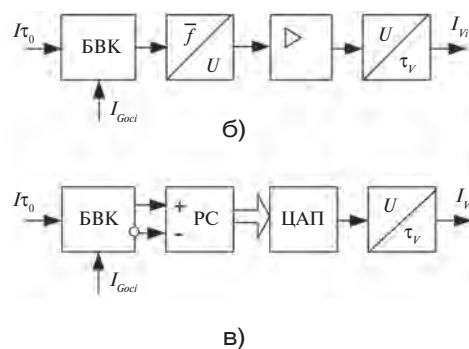
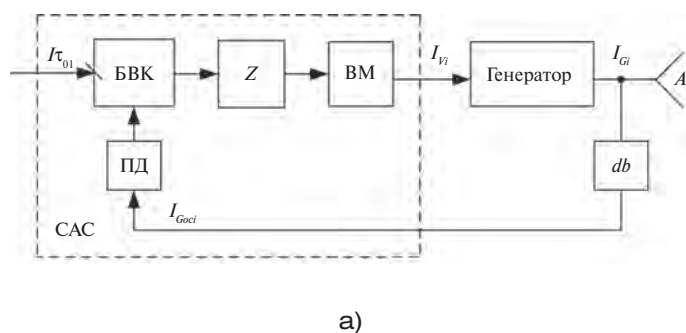


Рисунок 2. Структурная схема канала импульсной фазированной антенной решетки с бинарным временным компаратором (БВК) (а) и два варианта прямой ветви системы автоматической синхронизации (б, в): ПД – пиковый детектор; db – attenuатор; Z – фильтр; BM – временной модулятор; f/U – пассивный фильтр низких частот; Δ – усилитель; U/τ_v – временной модулятор; PC – реверсивный счетчик; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь

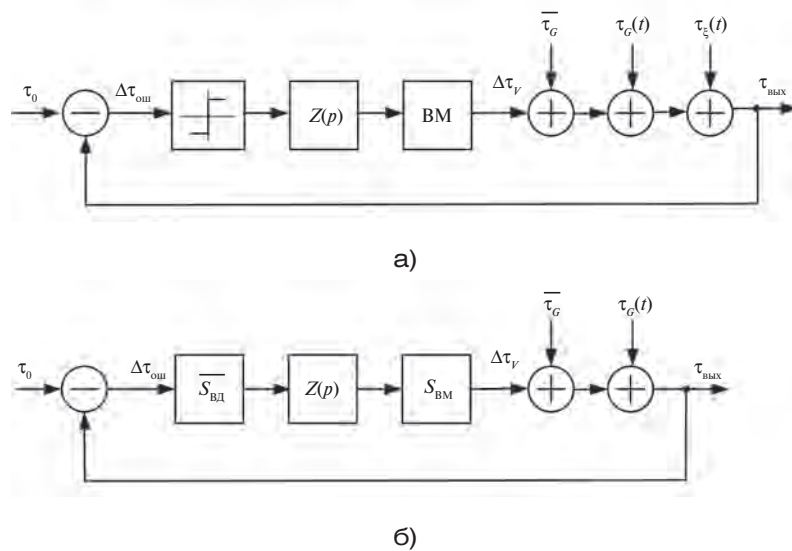


Рисунок 3. Система автоматической синхронизации антенного модуля: а – нелинейная модель; б – линейная модель

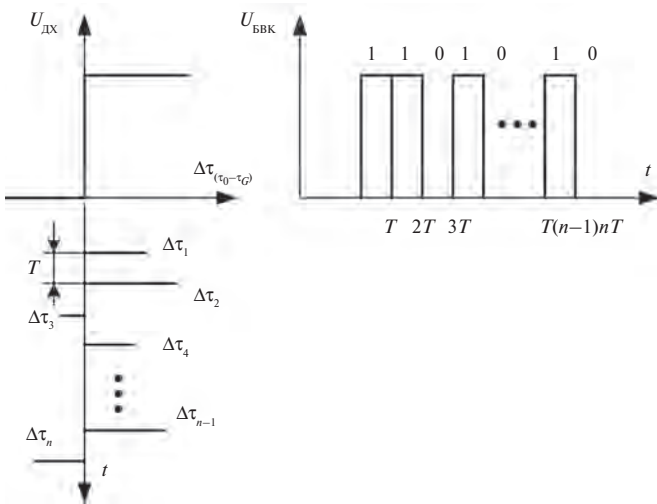


Рисунок 4. Дискриминационная характеристика ($U_{ДХ}$) и выходной сигнал ($U_{БВК}$) бинарного временного компаратора

Два варианта прямой ветви САС, реализованных в макетных образцах, с аналоговым фильтром и реверсивным счетчиком – интегратором, приведены на рис. 2а и 2б соответственно.

Меняющуюся задержку распространения сигнала генератора можно представить в виде нестационарного случайного процесса вида

$$\tau_{Gi}(t) = \bar{\tau}_{Gi} + \tau_{Gmi}(t) + \tau_{\xi i}(t), \quad (3)$$

где $\bar{\tau}_{Gi}$ – среднее значение процесса; $\tau_{Gmi}(t)$ – медленно меняющаяся во времени составляющая задержки; $\tau_{\xi i}(t)$ – высокочастотная центрированная стационарная случайная величина (джиттер).

Структура системы автоматической синхронизации параметра с нелинейностью дискриминационной характеристики релейного типа под

воздействием нестационарного процесса типа (3) представлена на рис. 3а.

Рис. 4 иллюстрирует работу бинарного временного дискриминатора. Временной дискриминатор имеет характеристику $U_{ДХ} = f(\Delta\tau)$ релейного типа.

В тактовые моменты времени T_N происходит определение бинарным дискриминатором знака задержки выходного импульса генератора относительно спада импульса опорного интервала. Из-за временных флуктуаций задержки сигнала генератора (джиттера) на выходе временного компаратора наблюдается случайная временная последовательность импульсов с постоянной амплитудой. Средняя частота следования импульсов (\bar{f}) этой последовательности зависит от временного рассогласования ($\Delta\tau$) импульса опорного интервала относительно выходного сигнала генератора и от среднеквадратического значения флуктуаций задержки генератора (σ_τ).

На экране стробоскопического осциллографа Hewlett Packard 83480А (рис. 5) показана осциллограмма наложения ансамбля выходных импульсов генератора АМ, находящегося в режиме синхронизации; стробоскоп синхронизирован фронтом импульса опорного интервала. Одновременно на экране отображается закон плотности вероятности временного рассогласования между импульсом опорного интервала и выходным импульсом генератора, причем видно, что он близок к нормальному закону распределения.

Выражение для средней частоты (\bar{f}) выходного сигнала бинарного временного компаратора имеет вид

$$\bar{f} = f(\tau_{ош}, \sigma_\tau) = \frac{f_m}{2} \left[1 + \Phi\left(\frac{\tau_0 - \tau_G}{\sigma_\tau}\right) \right], \quad (4)$$

где f_m – частота следования импульсов излучения АМ; $\Phi(\eta)$ – интеграл вероятности случайной величины η ; σ_τ – среднееквадратическое значение флуктуаций задержки генератора.

Наличие кратковременной нестабильности временного положения импульса генератора (джиттера) позволяет применить известный в теории систем автоматического регулирования метод статистической линеаризации релейной характеристики временного дискриминатора. Если рассогласование не выходит за пределы створа характеристики ($\Delta\tau_{\text{стб}}$) и постоянная времени сглаживающих цепей много больше периода дискретизации системы T_N , то нелинейная модель дискретной САС сводится к линейной с параметрами дискриминатора, определяемыми средней крутизной (\bar{S}) и шириной створа его линеаризованной дискриминационной характеристики ($\Delta\tau_{\text{стб}}$). Структура линейной модели САС представлена на рис. 3б. Рис. 6 иллюстрирует трансформацию формы дискриминационной характеристики БВК.

Крутизна линеаризованной дискриминационной характеристики бинарного временного компаратора (3 на рис. 6) определяется следующим образом:

$$\bar{S} = \frac{F_{\text{max}}}{\Delta\tau_{\text{стб}}}, \quad (5)$$

где F_{max} – частота следования импульсов излучения.

Линейная модель САС позволяет достаточно просто определить ряд основных параметров и характеристик системы: передаточную функцию по ошибке, статическую и динамическую ошибки в режиме синхронизации, а также такие параметры системы, как полоса удержания и захвата, время вхождения в режим синхронизации и пр.

Схемная реализация синхронизатора АМ с БВК

Существует несколько вариантов схемной реализации БВК. Проведенный анализ вариантов показал, что предпочтительной является реализация БВК САС субнаносекундного диапазона на основе быстродействующего D-триггера. В этом случае имеет место знаковая дискриминация входных сигналов и осуществляется функция хранения на время, равное периоду следования импульсов ИФАР.

При построении принципиальной электрической схемы временного дискриминатора на базе D-триггера учитываются следующие критерии выбора элементной базы (серии):

- наличие в используемой логической серии функционального элемента D-триггера с малыми временами длительности фронта и задержки распространения сигнала;

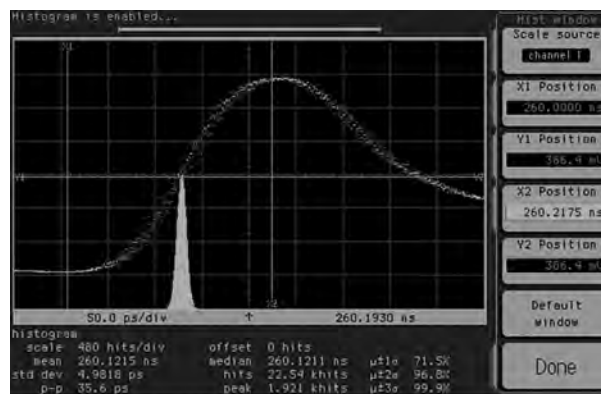


Рисунок 5. Режим синхронизации антенного модуля. Осциллограмма ансамбля наложенных выходных импульсов генератора с джиттером и плотность вероятности временного рассогласования импульсов генератора и опорного интервала синхрогенератора

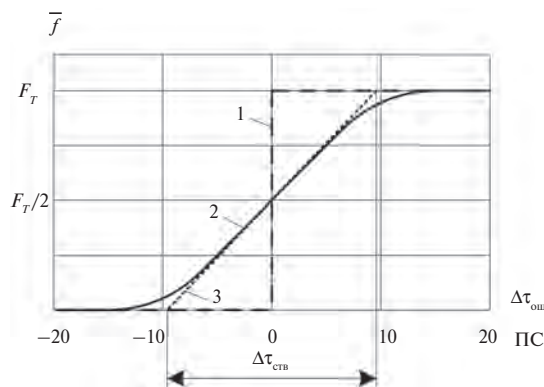


Рисунок 6. Вид дискриминационной характеристики (ДХ) бинарного временного компаратора: 1 – ДХ релейного типа; 2 – ДХ при наличии джиттера; 3 – аппроксимация ДХ отрезком прямой линии

- передаточная характеристика вентиля серии должна быть близкой к прямоугольной форме;
- высокая крутизна фронтов сигналов серии;
- стабильность порога переключения вентиля серии;
- температурная стабильность порога переключения вентиля;
- диапазон рабочих температур.

Основные параметры серий микросхем, перспективных для реализации бинарного временного компаратора, представлены в таблице.

Для подтверждения возможности работы D-триггера в БВК была экспериментально уточнена передаточная характеристика вентиля КМОП серии 1554. Схема измерительной установки

Таблица. Основные параметры серий микросхем, перспективных для реализации бинарного временного компаратора

Параметр	MC74ACT	MC10EP	K1500F100K	K6500	KP155474AC
Технология	МОП	ЭСЛ	ЭСЛ	S-EET	КМОП
Диапазон напряжения питания, В	5	3,0–5,6	-4,5	4,0–2,45	2,0–6,0
Диапазон температур, °С	От -40 до 85	От -40 до 85	От -10 до 75	От -10 до 75	От -40 до 85
Частота переключения D-триггера, МГц	210	3000	350	1000	150
Задержка распространения вентиля (ЛАЗ), нс	1,5	0,17	0,7	0,42	4,0
Задержка распространения триггера (ТМ2), нс	3,0	0,28	2,4	–	8,0
Температурный дрейф канальных задержек, 1/°С	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	–	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Длительность фронта, нс	0,7	0,13	1,0	0,16	0,7
Крутизна фронта, мВ/пс	7,1	6,2	0,8	6,3	7,1

показана на рис. 7а, а уточненная передаточная характеристика вентиля – на рис. 7б.

Экспериментально установлено, что передаточная характеристика вентиля с крутым переходом из одного состояния в другое имеет интервал неопределенности входного напряжения $\Delta U_{ш} \approx 0,01 U_{CC}$, т.е. при номинальном значении питающего напряжения $U_{CC} = 5$ В величина $\Delta U_{ш}$ составляет не более 50 мВ.

Длительность фронтов сигналов серии 1554, по документации равная 15–20 нс, измеренная с помощью стробоскопа Hewlett Packard 83480А, оказалась значительно меньше – 600–700 пс. Экспериментально установлена высокая температурная стабильность порога срабатывания, равного $0,5 U_{CC}$. По сути, вентиль является быстродействующим амплитудным компаратором с порогом $0,5 U_{CC}$. Временная неопределенность изменения состояния вентиля ($\tau_{сраб}$) на рис. 7в определяется следующим образом:

$$\Delta \tau_{сраб} = \frac{\Delta U_{ш}}{\Delta S_{\phi}} = \frac{\Delta U_{ш}}{U_{CC}} \tau_{\phi}, \quad (6)$$

где $\Delta U_{ш}$ – диапазон неопределенности входного напряжения перехода вентиля из состояния 0 в 1 или из 1 в 0; U_{CC} – номинальное значение питающего напряжения; τ_{ϕ} – длительность фронта сигнала, типичного для данной серии; S_{ϕ} – крутизна фронта сигнала.

При значениях $U_{CC} = 5$ В и определенных экспериментально значениях длительности фронта $\tau_{\phi} \approx 700$ пс и $\Delta U_{ш} \approx 50$ мВ временная неопределенность порога срабатывания вентиля составляет около 7 пс. Среднеквадратическая ошибка при определении временного положения фронта сигнала для нормального закона распределения равна около 3,5 пс.

Полученные экспериментальные данные послужили основанием для реализации бинарного компаратора на базе D-триггера данной серии. В рассматриваемом случае знаковая дискриминация входного и опорного сигналов осуществляется

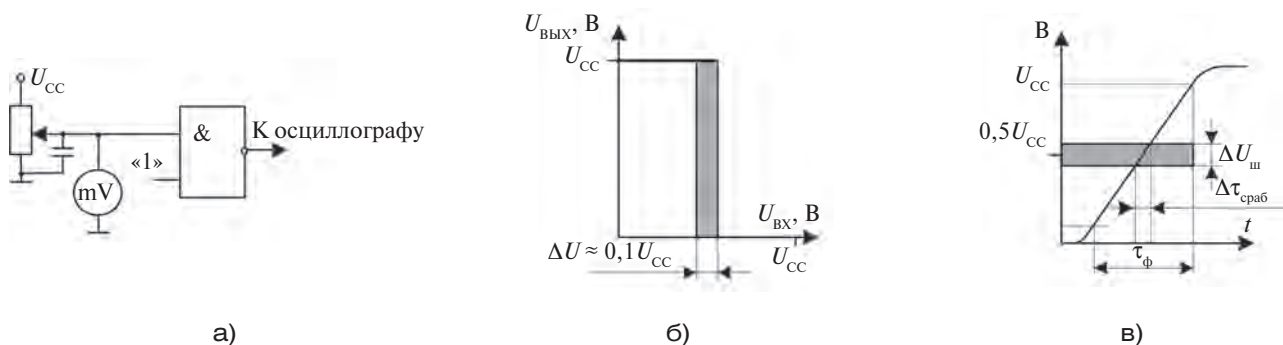


Рисунок 7. Схема для измерения передаточной характеристики вентиля (а), вид передаточной характеристики (б) и временная неопределенность ($\Delta \tau_{сраб}$) порога срабатывания вентиля серии KP1554 (в)

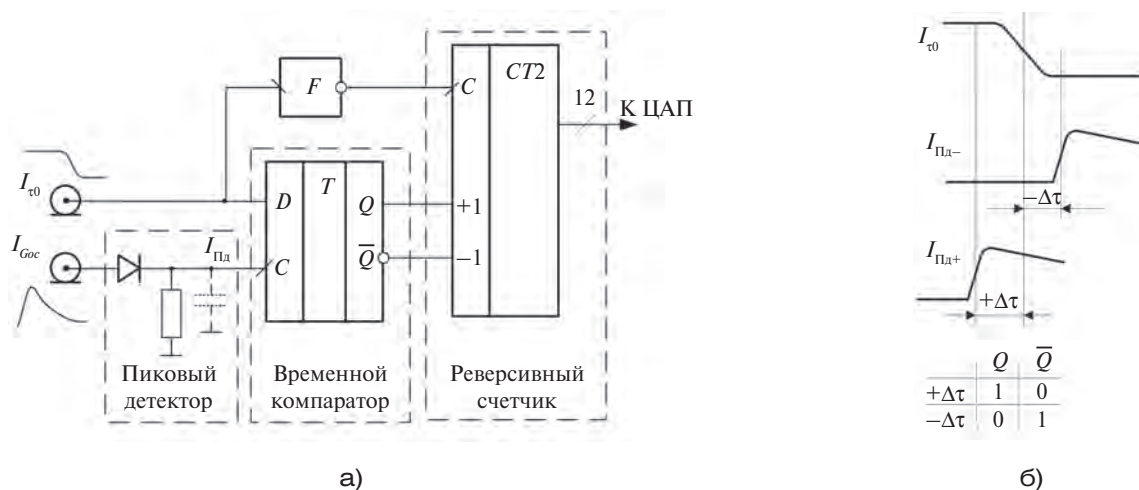


Рисунок 8. Электрическая принципиальная схема бинарного временного компаратора, сопряженного с цифровым реверсивным счетчиком (а), и осциллограммы на входах временного компаратора (б)

в моменты времени, соответствующие коротким интервалам на фронтах уровня порога срабатывания вентилей триггера. Предполагаемая оценка точности временного сдвига сигнала генератора относительно спада импульса опорного интервала при реализации временного компаратора на D-триггере серии 1554 имеет значение около 5 пс.

Электрическая принципиальная схема БВК

Электрическая принципиальная схема временного компаратора на базе D-триггера КР1554ТМ2 представлена на рис. 8а, а на рис. 8б приведены осциллограммы на входах D и C триггера с таблицей состояния его выходов как функции знака временного рассогласования ($\Delta\tau$).

На вход триггера D поступает импульс опорного интервала от сплиттера, а на вход C – выходной

сигнал генератора, прошедший через пиковый детектор. Пиковый детектор содержит быстродействующий импульсный диод КД922А.

Выводы

Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили возможность создания в субнаносекундном диапазоне бинарных временных компараторов с использованием микросхем D-триггеров быстродействующих КМОП-серий.

Физическое моделирование, лабораторные и стендовые испытания подтвердили высокую эффективность разработанной системы синхронизации с БВК. Экспериментальные исследования [3, 10] подтвердили высокую эффективность таких ИФАР при суммировании полей ансамбля независимых генераторов в свободном пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Merensky L. M., Kardo-Sysoev A. F., et al. A low-jitter 1.8-kV 100-ps rise-time 50-kHz repetition-rate pulsed-power generator // IEEE transactions on plasma science. 2009. Vol. 37. No. 9. P. 1855–1862.
2. Кошелев В. И. Антенные системы для излучения мощных сверхширокополосных импульсов. III Всероссийская конференция «Радиолокация и связь». ИРЭ РАН, 2000. С. 8–14.
3. Kardo-Sysoev A. F., Zazulin S. V., et al. Ultra wideband pulsed synchronized antenna array. Proceedings of International Conference Euroem 2000. Edinburgh, 2000. P. 343–349.
4. Флеров А. Н., Флерова А. А. Автоматическая синхронизация временного положения излучаемых сигналов импульсной фазированной антенной решеткой субнаносекундного диапазона // Радиопромышленность. 2017. № 4. С 26–33.
5. Кочин Л. Б., Страхов С. Ю., Матвеев С. А. Особенности работы беспроводного канала передачи энергии в динамическом режиме // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 79–88.
6. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Сов. радио, 1975. 296 с.
7. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. 4-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2016. 560 с.
8. Ерофеев А. А. Теория автоматического управления. СПб.: Политехник, 1998. 294 с.
9. Бессекерский В. А., Попов Е. П. Теория автоматического управления. 4-е изд. СПб.: Профессия, 2003. 747 с.
10. Активная фазированная решетка для излучения субнаносекундных импульсов / А. Ф. Кардо-Сысоев, С. В. Зозулин, А. Н. Флеров, А. Д. Французов // Проблемы транспорта. 2000. № 3. С. 179–194.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Флеров Александр Николаевич, ст. преподаватель, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (906) 278-91-97, e-mail: aflerov@list.ru.

Флерова Анастасия Александровна, к.т.н., доцент, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (911) 249-00-90, e-mail: anfleur@yandex.ru.

*For citation: Flerov A. N., Flerova A. A. System of automatic synchronization of temporal position of emitted signals of a subnanosecond pulsed phased antenna array. *Voprosy radioelektroniki*, 2019, no. 6, pp. 65–72. DOI 10.21778/2218-5453-2019-6-65-72*

A. N. Flerov, A. A. Flerova

SYSTEM OF AUTOMATIC SYNCHRONIZATION OF TEMPORAL POSITION OF EMITTED SIGNALS OF A SUBNANOSECOND PULSED PHASED ANTENNA ARRAY

The structure of a pulsed phased antenna array (PPAA) of the sub nanosecond range with an automatic synchronization system (ASS) of the temporal position of the emitted ultra-wideband (UWB) pulses is presented. Considered aspects of the implementation of the components of the ASS. Particular attention is paid to the implementation of the temporary discriminator. The possibility of implementing the ASS sub nanosecond time discriminator as a binary time comparator based on a high-speed D-trigger CMOS series has been proved. It is shown that in the presence of jitter of the output pulse of the generator, the nonlinear model of the system of automatic stabilization of the parameter with the characteristics of a relay type discriminator is reduced to a linear model, which makes it possible to simply determine the main parameters and characteristics of the ASS. The results of the above analysis were confirmed by laboratory and bench tests of the ASS elements and PPAA mock-up samples.

Keywords: generation of UWB pulses, temporal spatial synchronization, automatic parameter stabilization system, temporal discriminator

REFERENCES

1. Merensky L. M., Kardo-Sysoev A. F., et al. A low-jitter 1.8-kV 100-ps rise-time 50-kHz repetition-rate pulsed-power generator. *IEEE transactions on plasma science*, 2009, vol. 37, no. 9, pp. 1855–1862.
2. Koshelev V. I. Antenna systems for the radiation of powerful ultra-wideband pulses. (Conference proceedings) III Vserossiiskaya konferentsiya «Radiolokatsiya i svyaz». IRE RAS, 2000, pp. 8–14. (In Russian).
3. Kardo-Sysoev A. F., Zazulin S. V., et al. Ultra wideband pulsed synchronized antenna array. Proceedings of International Conference Euroem 2000, Edinburgh, UK, 2000, pp. 343–349.
4. Flerov A. N., Flerova A. A. Automatic synchronization of the time position of the emitted signals of the pulse phased antenna array of the sub nanosecond range. *Radiopromyshlennost*, 2017, no. 4, pp. 26–33. (In Russian).
5. Kochin L. B., Strakhov S. Yu., Matveev S. A. Features of the wireless energy transfer's channel in a dynamic mode. *Voprosy radioelektroniki*, 2018, no. 7, pp. 79–88. (In Russian).
6. Kazarinov Yu. M., editor. *Poisk, obnaruzhenie i izmerenie parametrov signalov v radionavigacionnyh sistemah* [Search, detection and measurement of signal parameters in radio navigation systems]. Moscow, Sov. radio Publ., 1975, 296 p. (In Russian).
7. Yurevich E. I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control]. 4th ed. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2016, 560 p. (In Russian).
8. Erofeev A. A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control]. Saint-Petersburg, Politekhnik Publ., 1998, 294 p. (In Russian).
9. Bessekersky V. A., Popov E. P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control]. 4th ed. Saint-Petersburg, Professiya Publ., 2003, 747 p. (In Russian).
10. Kardo-Sysoev A. F., Zozulin S. V., Flerov A. N., Frantsuzov A. D. Active phased array for emitting subnanosecond pulses. *Problemy transporta*, 2000, no. 3, pp. 179–194. (In Russian).

AUTHORS

Flerov Aleksandr, associate professor, Ustinov Baltic State Technical University «ВОЕНМЕХ», 1, 1st Krasnoarmejskaja St., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (812) 316-23-41, e-mail: aflerov@list.ru.

Flerova Anastasiya, Ph. D., associate professor, Ustinov Baltic State Technical University «ВОЕНМЕХ», 1, 1st Krasnoarmejskaja St., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (812) 316-23-41, e-mail: anfleur@yandex.ru.