

А. Н. Флеров, А. А. ФлероваБалтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,
Санкт-Петербург, Россия

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ ВРЕМЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИЗЛУЧАЕМЫХ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ СУБНАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

Для повышения излучаемой мощности импульсных антенных решеток (ИАР) наносекундного и субнаносекундного диапазонов, находящих все большее применение в системах связи, локации и радиоэлектронной борьбе, применен метод наращивания числа независимых антенных модулей, содержащих излучатель и менее мощный генератор, по сравнению с решеткой с одиночным мощным генератором. Но при этом возникла необходимость осуществлять пространственную синхронизацию излучаемых этими модулями сигналов, так как в этих диапазонах реализация такой задачи встречает значительные трудности, ввиду того что временной уход положения импульсов генераторов соизмерим с их длительностью. Для решения этой задачи в каждый антенный модуль были внедрены синхронизатор, описываемый как дискретная автоматическая стабилизация параметра с нелинейностью дискриминационной характеристики временного дискриминатора релейного типа. Наличие джиттера временного положения излучаемого генератором импульса приводит к линеаризации релейной характеристики дискриминатора, что позволило применить для анализа линейную модель системы синхронизации и облегчило определение ее параметров, таких как время вхождения в режим синхронизации, полосу захвата и удержания, величин статической и динамической ошибок временного положения импульса. Экспериментальные двух- и четырехэлементные ИАР показали возможность синхронизации сигналов в этих диапазонах и высокое качество пространственного сведения сигналов. Впервые в мировой практике была осуществлена автоматическая пространственная синхронизация временного положения излучаемых отдельными генераторами импульсов наносекундной и субнаносекундной длительности, что подтвердило возможность практически неограниченного наращивания излучаемой мощности ИАР в этих диапазонах.

Ключевые слова: сверхкороткий импульс, генерация субнаносекундных импульсов, импульсная антенная решетка, временная синхронизация, сложение мощностей.

Для цитирования: Флеров А. Н., Флерова А. А. Автоматическая синхронизация временного положения излучаемых сигналов импульсной фазированной антенной решеткой субнаносекундного диапазона // Радиопромышленность. 2017. № 4. С. 26–33.

A. N. Flerov, A. A. Flerova

Baltic State Technical University VOENMEH, Saint-Petersburg, Russia

AUTOMATIC SYNCHRONIZATION OF THE TIME POSITION OF THE EMITTED SIGNALS OF THE PULSE PHASED ANTENNA ARRAY OF THE SUBNANOSECOND RANGE

To increase the radiated power of pulsed antenna arrays (PAR) of nanosecond and subnanosecond ranges, which are increasingly used in communication, location and electronic warfare systems, a method is used to increase the number of independent antenna modules containing an antenna and a less powerful generator, compared to a grating based on a single powerful generator. However, it became necessary to realize spatial synchronization of the signals emitted by these

modules. In these ranges, the implementation of such a task is very difficult, due to the fact that the time shift of the position of the pulses of the generators is approximately equal to the pulse width. To solve this problem, a synchronizer was introduced into each antenna module, described as a discrete automatic parameter stabilization system with non-linearity of the discriminating characteristic of a time-based discriminator of the relay type. The presence of jitter of the time position of the pulse emitted by the generator results in linearization of the discriminator's relay characteristic, which made it possible to apply a linear model of the synchronization system for analysis and facilitated the determination of its parameters, such as the time of entering the synchronization mode, the capture and holding band, the static and dynamic errors of the time position of the pulse. Experimental PAR consisting of two and four elements showed the possibility of synchronization of signals in these bands and high quality of spatial alignment of signals. For the first time in the world, automatic spatial synchronization of the time position of nanosecond and subnanosecond pulses emitted by individual generators was realized, which confirmed the possibility of an almost unlimited increase in the radiated power of PAR in these ranges.

Keywords: ultrashort pulse, the generation of sub-nanosecond pulses, a pulse array antenna, time synchronization, the radiation power addition.

For citation: Flerov A. N., Flerova A. A. Automatic synchronization of the time position of the emitted signals of the pulse phased antenna array of the subnanosecond range. Radiopromyshlennost, 2017, no. 4, pp. 26–33 (In Russian).

DOI 10.21778/2413-9599-2017-4-26-33

Введение

Импульсные антенные решетки (ИАР) наносекундного и субнаносекундного диапазонов находят применение в системах связи, локации, радиоэлектронной борьбы [1–6]. Преимущество решеток с ансамблем независимых генераторов, по сравнению с одиночным равномошным генератором, состоит в том, что появляется возможность путем увеличения их числа неограниченно наращивать излучаемую мощность и, соответственно, суммарное значение напряженности поля в дальней зоне за счет сложения напряженностей полей, создаваемых отдельными излучателями. Одновременно решается задача защиты от электрического пробоя в антенном фидере.

Составляющие полотна ИАР – антенные модули (АМ) – включают в себя собственно антенну, генератор и синхронизатор. Все АМ возбуждаются сигналом от синхрогенератора распределенным на них сплиттером. В АМ ИАР были применены генераторы, разработанные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе [7–12], с двухступенчатым временным сжатием первичного импульса, сформированного мощным ключом на полевом транзисторе, с помощью кремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением и динисторных обострителей.

ИАР с системой синхронизации и сканирования, блоком управления и программным обеспечением измерительного комплекса были разработаны и изготовлены в БГТУ «ВОЕНМЕХ».

ФТИ им. А.Ф. Иоффе и БГТУ «ВОЕНМЕХ» совместно создали экспериментальную установку для двух и четырех синхронизированных АМ, с амплитудами выходных импульсов генераторов 1,5 и 8 кВ с импульсной мощностью на нагрузке 50 Ом, 45 кВт и 1,3 МВт соответственно, а также разработали рабочую документацию экспериментальных ИАР с наращиванием числа АМ до 32.

Структурная схема ИАР

Структурная схема ИАР представлена на рис. 1. В состав ИАР входят антенные модули и синхрогенератор. Антенный модуль (АМ) (на рис. 2) предназначен для генерации, излучения верхширокополосного (СШП) сигнала и синхронизации его временного положения. АМ содержит излучатель (A_i), выполненный на двух ТЕМ-рупорах генератор (G_i) и синхронизатор, содержащий временной дискриминатор (ВД), интегратор, временной модулятор синхронизатора (BM_{CX}), аттенюатор и пиковый детектор. Также в состав АМ входят модулятор сканирования (M_{CK}) и адаптер АМ. Генератор G_i предназначен для формирования высоковольтного импульса возбуждения антенны с амплитудой несколько киловольт, длительностью фронта и длительностью по полуширине порядка 100–120 и 250–300 пикосекунд соответственно. Синхронизатор антенного модуля осуществляет автоматическую временную привязку излученного электромагнитного импульса к определенному моменту времени, определяемого синхронизатором. ВД синхронизатора осуществляет сравнение временного положения излученного электромагнитного импульса относительно временного положения спада импульса опорного интервала и вырабатывает сигнал рассогласования, поступающий после интегрирования на управляющий вход временного модулятора (BM_{CX}), предназначенного для изменения задержки импульса запуска генератора. Интегратор синхронизатора антенного модуля входит в состав замкнутой системы автоматического регулирования положения излучаемого импульса с астатизмом первого порядка. Аттенюатор и пиковый детектор формируют сигнал обратной связи, поступающий на ВД синхронизатора. Адаптер АМ предназначен для связи АМ с ПК для контроля состояния и управления АМ (индикации наличия излучения, наличия состояния синхронизации,

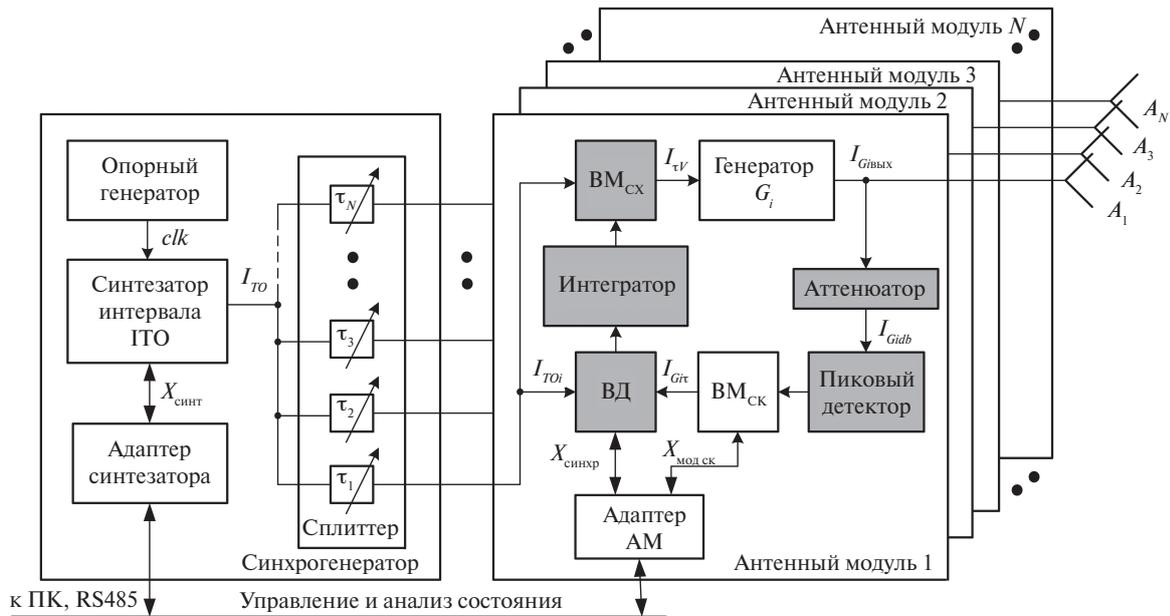


Рисунок 1. Структурная схема ИАР

включения генератора, управления временным модулятором сканирования и пр.). Синхрогенератор ИАР, состоящий из опорного генератора, синтезатора опорного интервала, сплиттера и адаптера синхрогенератора, предназначен для формирования импульса высокостабильного опорного интервала (I_{TO}) и его распределения на антенные модули. Синхрогенератор обеспечивает работу на различных частотах повторения от 5 Гц до 100 кГц. Опорный генератор с кварцевой стабилизацией является тактовым для синхронизатора. Синтезатор формирует программируемый по длительности высокостабильный временной интервал (импульс I_{TO}). Сплиттер осуществляет распределение сигнала опорного

интервала I_{TO} на входы антенных модулей. Адаптер синхрогенератора служит для обработки сигналов интерфейса RS485 от ПК с целью управления параметрами синтезатора, такими как частота следования, длительность опорного интервала, а также контроля его состояния. Временной модулятор сканирования (ВМСК), включенный в кольцо синхронизатора, изменяя задержку импульса генератора, поступающего с аттенюатора и пикового детектора, осуществляет временной сдвиг канального излученного импульса данного АМ с целью изменения положения максимума диаграммы направленности (ДН).

Измерительный комплекс с 16-канальной ИАР показан на рис. 2. Помимо собственно ИАР в него

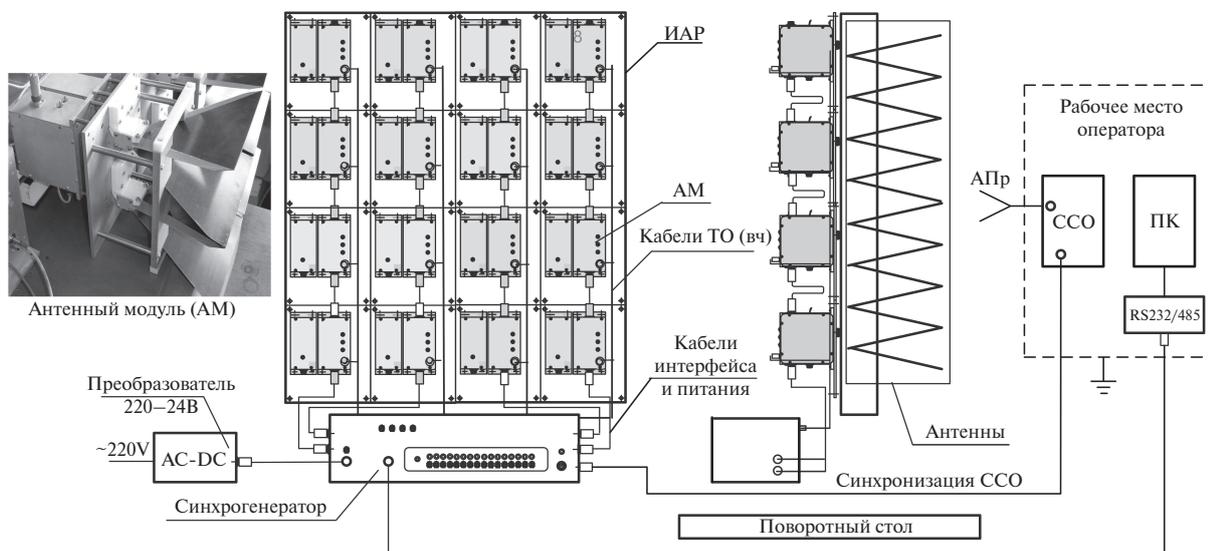


Рисунок 2. Измерительный комплекс с ИАР (16 каналов)

входят измерительная антенна (АПР), стробоскопический осциллограф (ССО) и персональный компьютер (ПК), связанный с ИАР через преобразователь интерфейса RS-232/485.

Температурная погрешность синхронизации каналов ИАР

Основной трудностью при реализации ИАР субнаносекундного диапазона является устранение нестабильности временного положения излучаемых антенными модулями сигналов. Излучаемый сигнал (рис. 3а) близок по форме к моноциклу Гаусса, и его длительность соизмерима с длительностью выходного импульса генератора (рис. 3б). Известны решетки с прямой жесткой синхронизацией, как, например, Jenn2 PSI Phillips lab (USA); Jenn3 UNM Phillips lab (USA), в которых, за счет введения регулируемых задержек, выравнивается начальный разброс задержек распространения сигнала в каналах ИАР. Такой метод позволяет иметь удовлетворительную синхронизацию в течение нескольких десятков минут, после чего возникает необходимость в повторной юстировке.

На примере двух каналов ИАР [3] можно показать, что разность задержек распространения сигналов в каналах i и j с задержками распространения τ_{zi} и τ_{zj} , обусловленная начальным разбросом и температурным дрейфом этих задержек, определяется выражением

$$\Delta\tau_{D(i-j)}^{(t)} = \Delta\tau_{D(i-j)}^{(0)}\alpha_{\tau}\Delta T^{\circ}, \quad (1)$$

где $\Delta\tau_{D(i-j)}^{(0)}$ – разность задержек распространения сигналов двух каналов при температуре 20 °С; α_{τ} – температурный коэффициент задержки (ТКЗ); ΔT° – диапазон изменения температуры среды.

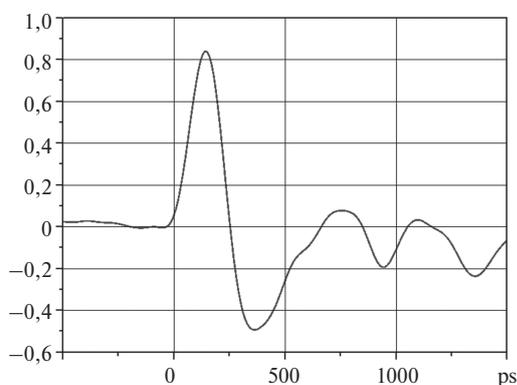
Выражение (1) позволяет оценить ошибку в системе сведения сигналов двух каналов при медленном дрейфе их задержек распространения

(преимущественно в модуляторах и генераторах) под действием температуры. Из (1) следует, что разностный временной сдвиг выходных импульсов каналов тем больше, чем больше начальный разброс их задержек распространения $\Delta\tau_{D(i-j)}^{(0)}$. Так, например, для среднего значения задержки распространения каналов 200 нс, 10%-го разброса начальных задержек каналов, при одинаковых значениях α_{τ} , равных $(2-5)10^{-3}$, и диапазоне температур ΔT° , равном 10 °С, ошибка сведения имеет значение в диапазоне 400–1000 пс, соизмерима или превышает длительность излучаемого импульса. Выравнивание задержек в каналах ИАР при начальной юстировке необходимо осуществлять в устройстве с малым временем распространения сигнала, т.е. сплиттер должен иметь, возможно, меньшее номинальное значение этой задержки. При среднем значении задержки распространения каналов сплиттера 4–10 нс ошибка сведения каналов будет составлять 20–50 пс. Неидентичность ТКЗ-каналов также влияет на величину ошибки сведения.

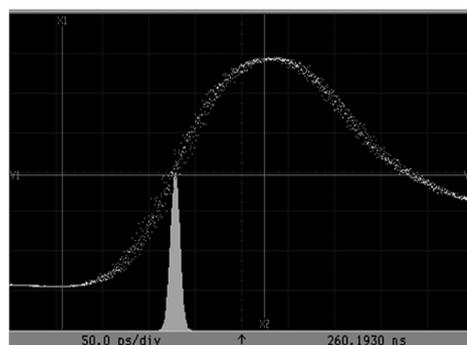
Для осуществления функции сканирования временные модуляторы сканирования ($BM_{СК}$) могут быть как размещены в каналах сплиттера, так и войти в состав кольца синхронизации АМ, но, учитывая, что значения их задержек распространения в десятки раз превышает значения задержек распространения каналов сплиттера, модуляторы сканирования необходимо размещать в кольце АМ, как показано на рис. 1, при этом собственный температурный дрейф модуляторов сканирования будет нивелироваться системой автоматической синхронизации АМ.

Алгоритм работы системы синхронизации выходных сигналов АМ

Система синхронизации сигналов АМ ИАР является многоканальной системой, каждый канал которой (рис. 4а) состоит из трех основных узлов:



а)



б)

Рисунок 3. Излученный импульс (а) и выходной импульс генератора и его джиттер (б)

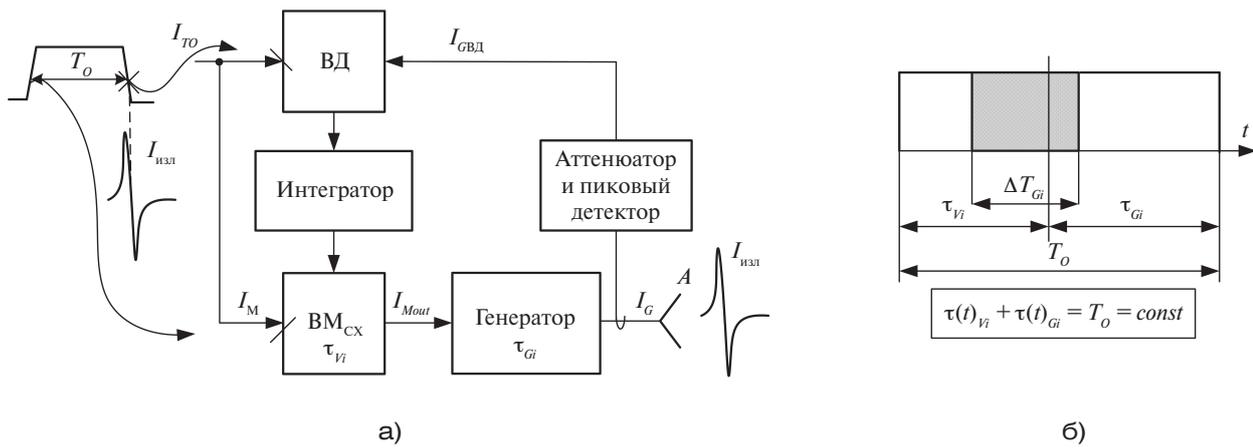


Рисунок 4. Структурная схема, поясняющая принцип синхронизации временного положения сигнала генератора (а) и условие синхронизации выходного импульса канала ИАР (б)

временного модулятора синхронизатора (ВМ_{СХ}), временного дискриминатора (ВД) и интегратора.

На вход модулятора ВМ_{СХ} поступает сигнал опорного интервала I_M (I_{TO}) от сплиттера синхрогенератора, при этом активным является фронт сигнала. Выходной сигнал временного модулятора I_{Mout} поступает на вход генератора антенного модуля (G_i). Выходной сигнал генератора I_G с задержкой распространения τ_{Gi} флуктуирует относительно импульса запуска в диапазоне $\Delta\tau_{Gi}$ из-за действия различных дестабилизирующих факторов (рис. 4б).

Временное положение выходного импульса генератора и, следовательно, излученного импульса АМ меняется путем изменения задержки (τ_{vi}) временного модулятора, управляемого выходным напряжением интегратора. Сигнал I_{TO} поступает также на вход временного дискриминатора (ВД), но при этом активным является спад этого сигнала. На другой вход ВД, через пиковый детектор, подается ослабленный аттенуатором сигнал генератора $I_{GВД}$. Временной дискриминатор, интегратор и временной модулятор синхрогенератора образуют петлю отрицательной обратной связи, охватывающую генератор.

Условием синхронизации выходных импульсов генераторов всех каналов ИАР [3] является выполнение условия

$$\tau_{Gi}(t) + \tau_{vi}(t) = T_0 = const, \quad (2)$$

где $\tau_{Gi}(t)$ – флуктуирующая низкочастотная задержка выходного импульса i -го генератора решетки относительно импульса запуска генератора I_{Mout} ; $\tau_{vi}(t)$ – следящая задержка временного модулятора; T_0 – длительность импульса опорного интервала I_{TO} (формируемая в синхрогенераторе). Временная диаграмма, иллюстрирующая условие (2), представлена на рис. 4б, где также показан

возможный диапазон изменения задержки генератора $\Delta\tau_G$ вследствие температурного дрейфа. Аппаратная реализация условия (2) и определяет структуру системы синхронизации.

Если ввести дополнительный временной модулятор (ВМ_{СК}) в кольцо обратной связи синхронизатора, как показано на рис. 1, то путем изменения задержки распространения сигнала этого модулятора можно влиять на положение выходного импульса генератора данного канала (и, соответственно, излученного импульса). Если изменять значения задержек модуляторов сканирования в каналах по определенному закону, то излученные импульсы будут суммироваться в направлении, отличном от нормали к полотну ИАР, т.е. будет меняться направление максимума излучения. Изменение временного положения излучаемых импульсов при изменении задержки модуляторов сканирования поясняют временные диаграммы на рис. 5.

Реализация синхронизатора антенного модуля

Структура синхронизатора, реализованного в АМ, представляет собой дискретную систему автоматической стабилизации параметра с нелинейностью дискриминационной характеристики временного дискриминатора релейного типа [13, 14]. Такая структура оказалась способной обеспечивать требуемую инструментальную точность и позволила обойтись без системы предварительного поиска сигнала генератора на временной оси при вхождении в режим синхронизации или срыве синхронизации.

Наличие кратковременной временной неустойчивости временного положения излучаемого импульса генератора (джиттер на рис. 3б) приводит к линеаризации релейной характеристики временного дискриминатора. При этом нелинейная

модель системы синхронизации сводится к линейной модели с параметрами дискриминатора, определяемыми средней крутизной дискриминатора и шириной створа его дискриминационной характеристики. Это позволяет достаточно легко оценить параметры системы синхронизации, такие как статическая и динамическая ошибка временного положения излучаемого импульса, постоянная времени синхронизатора, время вхождения в режим синхронизации и пр.

Временной дискриминатор АМ реализован как бинарный квантователь временных интервалов (временной компаратор), входное напряжение которого является функцией знака временного рассогласования:

$$y_{\text{вых}} = U_m \text{sign}(\Delta\tau), \quad (3)$$

где $\Delta\tau$ – временное рассогласование сигналов на входах временного дискриминатора; U_m – амплитуда выходных сигналов дискриминатора уровней стандартной МОП логики.

Оригинальным решением является применение в схеме ВД наносекундного диапазона быстродействующего D -триггера логической серии 74АС, посредством которого осуществляется знаковая дискриминация входных сигналов и функция хранения, при этом привязка к входному и опорному сигналам осуществляется по фронтам. Основным достоинством такого устройства временного дискриминатора является предельная простота реализации и удобство согласования выхода временного дискриминатора с интегратором, в качестве которого использован реверсивный счетчик, выполненный на микросхемах этой же серии. Во временных модуляторах с наносекундным диапазоном изменения задержек применены диоды с накоплением заряда (ДНЗ).

Для преобразования выходного кода реверсивного счетчика-интегратора в управляющее напряжение модуляторами предназначены микросхемы ЦАП.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные исследования двух и четырех элементных ИАР подтвердили высокую эффективность предложенной системы синхронизации. Было достигнуто качество сведения (определяемого как отношение алгебраической суммы значений напряженности поля отдельных АМ к измеренному суммарному значению поля в режиме синхронизации ИАР) не хуже чем 0,95.

Пример определения качества сведения сигналов генераторов по отдельной выборке значений напряженности поля в дальней зоне 4-канальной ИАР: измеренные уровни сигналов отдельных генераторов (с помощью стробоскопа, в мВ) имели значения

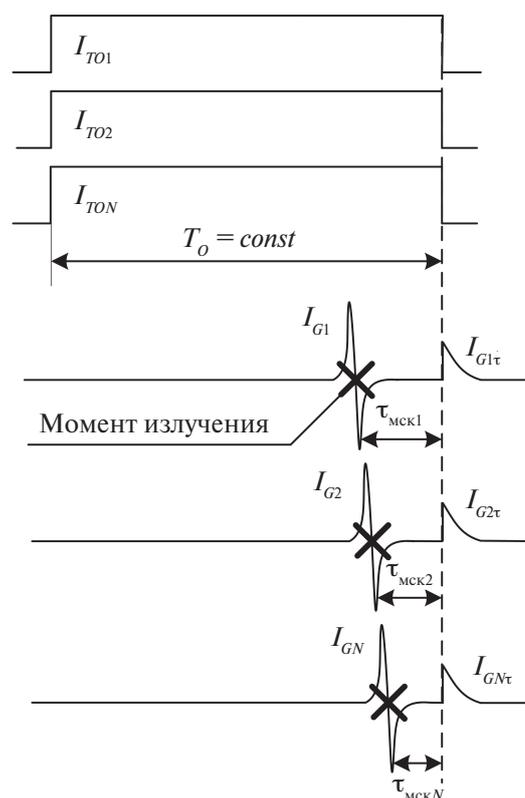


Рисунок 5. Временные диаграммы АМ, поясняющие работу АМ ИАР в режиме сканирования

54, 57, 55, 58 мВ, при этом сумма этих значений ($S_{\text{РАСЧ}}$) равнялась 224 мВ. А измеренное суммарное значение ($S_{\text{ИЗМ}}$) при работе всех АМ в режиме синхронизации, считанное с экрана осциллографа, было равно 220 мВ. Соответственно, для этой выборки качество сведения равно $S_{\text{ИЗМ}}/S_{\text{РАСЧ}} = 0,98$. Измерения производились при постоянной температуре. На рис. 6а, 6б представлены осциллограммы (на выходе аттенюатора) временного положения выходного импульса генератора АМ в отсутствие и при наличии синхронизации.

Экспериментальная эксплуатация ИАР показала, что качество синхронизации в диапазоне температур $+10 - -25^{\circ}\text{C}$ заметно не ухудшалось в течение нескольких десятков часов ее периодической работы.

Выводы

1. Впервые в мировой практике [15] была осуществлена пространственная автоматическая синхронизация сигналов ансамбля антенных модулей, предназначенных для излучения сверхкоротких электромагнитных импульсов субнаносекундного диапазона, с целью эффективного суммирования их полей в свободном пространстве.
2. Экспериментальная ИАР субнаносекундного диапазона, позволяющая осуществить

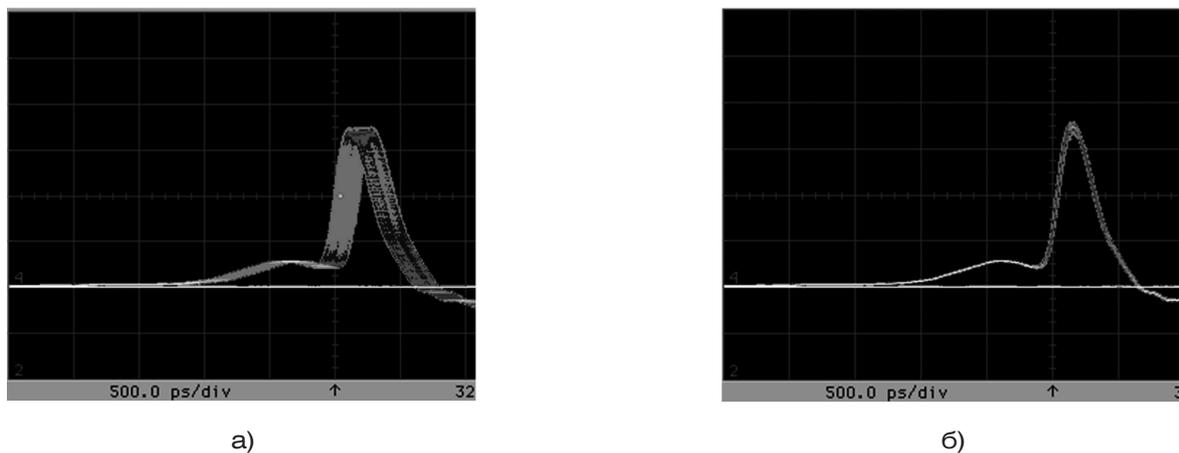


Рисунок 6. Уход временного положения выходного импульса генератора (а) и выходной импульс генератора в режиме синхронизации (б). Время измерения – 10 минут, $t^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$

синхронизацию временного положения сигналов антенных модулей и сканирование луча, показала свою работоспособность и надежность. Подтверждено

высокое качество сведения сигналов при длительной работе ансамбля независимых генераторов антенных модулей ИАР в режиме синхронизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.: Радио и связь, 1989, 192 с.
2. Taylor J. D. Ultra-wideband Radar Technology. CRC Press Boca Raton, London, New York, Washington, 2000, 424 p.
3. Активная фазированная решетка для излучения субнаносекундных импульсов. Проблемы транспорта / А.Ф. Кардо-Сысоев, С.В. Зозулин, А.Н. Флеров, А.Д. Французов; под ред. Г.В. Анцева. СПб.: Агентство "РДК-принт", 2000. Вып. 3. С 179–194.
4. Oicles J., Staskus M., Brunemeier P. High-power impulse generators for UWB applications. Presented at the Second International Conference on Ultra – Wideband, Short – Pulse Electromagnetics, Apr. 5–7, 1994, pp. 1.
5. Fast Power Switches from Picosecond to Nanosecond Time Scale and Their Application to Pulsed Power. Tenth IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, New Mexico, 1995, pp. 342–347.
6. Осипов М.Л. Сверхширокополосная радиолокация // Радиотехника. 1995. № 3. С. 3–6.
7. Семейство высокочастотных дрейфовых диодов для генерации импульсных сигналов пикосекундной длительности / А.Ф. Кардо-Сысоев, В.А. Козлов, С.А. Морякова, И.А. Смирнова // 13-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 8–12 сентября 2003 г. С. 193–198.
8. Merensky L. M., Kardo-Sysoev A. F., Flerov A. N., Pokryvailo A., Shmilovitz D., Kesar A. S. 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.
9. Kardo-Sysoev A. F., Brylevsky V.I., Lelikov Y.S., Smirnova I.A., Zazulin S.V. Generation and radiation of powerful nanosecond and subnanosecond pulses at high pulse repetition rate for UWB systems. Proceedings of International Ultra-wideband Conference, Washington, DC USA. 1999.
10. Кюреган А.С. Теория дрейфовых диодов с режимом восстановлением // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. Вып. 6. С. 57–64.
11. Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А. Ф., Ярин П.М. Полупроводниковый генератор высоковольтных прямоугольных импульсов с регулируемой длительностью // Приборы и техника эксперимента. 1997. Вып. 4. С. 47–48.
12. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов с субнаносекундным фронтом нарастания / С.В. Коротков, Ю.В. Аристов, Д.А. Коротков, А.Г. Люблинский // Приборы и техника эксперимента. 2010. Вып. 6. С. 153–154.
13. Радиоавтоматика: учебное пособие для студентов вузов, специальность «Радиотехника» / В.А. Бесекерский, А.А. Елисеев, А.В. Небылов и др.; под ред. В.А. Бесекерского. М.: Высшая школа, 1985. 271 с.
14. Юревич Е.И. Теория автоматического управления; 4-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2016. 560 с.
15. Kardo-Sysoev A. F., Zazulin S.V., Flerov A. N., Frantsyov A. D. Ultra Wideband Pulsed Synchronized Antenna Array. Proceedings of International Conference Euroem, Edinburgh, Scotland, UK, 30 May – 2 June, 2000.

REFERENCES

1. Astanin L. Yu., Kostylev A. A. *Osnovy sverhshirokopolosnykh radiolokacionnykh izmerenij* [Fundamentals of ultra-wideband radar measurements]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1989, 192 p. (In Russian).
2. Taylor J. D. Ultra-wideband Radar Technology. CRC Press Boca Raton, London, New York, Washington, 2000, 424 p.

3. Kardo-Sysoev A. F., Zozulin S.V., Flerov A.N., Frantsuzov A.D. *Aktivnaja fazirovanaja reshetka dlja izluchenija subnanosekundnyh impulsov. Problemy transporta* [Active phased array for subnanosecond pulses emission. Transport problems]. In: G.V. Ancev, ed. Saint-Petersburg, Agentstvo «RDK-print», 2000, iss. 3, pp. 179–194 (In Russian).
4. Oicles J., Staskus M., Brunemeier P. High-power impulse generators for UWB applications. *Presented at the Second International Conference on Ultra – Wideband, Short – Pulse Electromagnetics*, Apr. 5–7, 1994. p. 1.
5. Fast Power Switches from Picosecond to Nanosecond Time Scale and Their Application to Pulsed Power. *Tenth IEEE International Pulsed Power Conference*, Albuquerque, New Mexico, 1995, pp. 342–347.
6. Osipov M.L. Ultra-wideband radio positioning. *Radiotekhnika*, 1995, no. 3, pp. 3–6 (In Russian).
7. Kardo-Sysoev A. F., Kozlov V.A., Moryakova S.A., Smirnova I.A. A range of high-frequency drift diodes for key pulsing of picosecond duration. 13-ja Mezhdunarodnaya konferentsiya «SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii», Sevastopol, Sept. 8–12, 2003, pp. 193–198 (In Russian).
8. Merensky L.M., Kardo-Sysoev A. F., Flerov A.N., Pokryvailo A., Shmilovitz D., Kesar A.S. 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.
9. Kardo-Sysoev A. F., Brylevskiy V.I., Lelikov Y.S., Smirnova I.A., Zazulin S.V. Generation and radiation of powerful nanosecond and subnanosecond pulses at high pulse repetition rate for UWB systems. *Proceedings of International Ultra-wideband Conference*, Washington, DC USA, 1999.
10. Kyuregyan A.S. The theory of drift diodes with a sharp recovery. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2004, vol. 74, iss. 6, pp. 57–64 (In Russian).
11. Efanov V.M., Kardo-Sysoev A. F., Yarin P.M. Semiconductor generator of high-voltage square wave pulses with adjustable duration. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1997, iss. 4, pp. 47–48 (In Russian).
12. Korotkov S.V., Aristov Yu. V., Korotkov D. A., Lyublinskiy A. G. High-voltage nanosecond pulses generator with subnanosecond pulse leading front. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2010, iss. 6, pp. 153–154 (In Russian).
13. Besekerskiy V.A., Eliseev A.A., Nebylov A.V. et al. *Radioavtomatika. Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov.* [Radioautomatics. Textbook for University students.]. In: V.A. Besekerskiy, ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985, 271 p. (In Russian).
14. Yurevich E.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control theory]. 4-e izd., pererab. i dop. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2016, 560 p. (In Russian).
15. Kardo-Sysoev A. F., Zazulin S.V., Flerov A.N., Frantsuzov A.D. Ultrawide band Pulsed Synchronized Antenna Array, *Proceedings of International Conference Euroem 2000*, Edinburgh, Scotland, UK, 30 May – 2 June, 2000.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Флеров Александр Николаевич, доцент, кафедра «И4 радиоэлектронные системы управления», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 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, кафедра «И4 радиоэлектронные системы управления», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (911) 249-00-90, e-mail: anfleur@yandex.ru.

AUTHORS

Flerov Aleksandr, associate professor, Baltic State Technical University VOENMEH, 1, 1-ya Krasnoarmeyskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (906) 278-91-97, e-mail: aflerov@list.ru.

Flerova Anastasiya, PhD, associate professor, Baltic State Technical University VOENMEH, 1, 1-ya Krasnoarmeyskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (911) 249-00-90, e-mail: anfleur@yandex.ru.