

Формирование и усиление сигналов

DOI 10.66032/2221-2574-2025-1-3-19-29

УДК 621.396

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЦАП

Грошков Игорь Дмитриевич

инженер-конструктор I категории АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов»¹,
аспирант АНО ДПО «Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны
«Алмаз – Антей» им. академика В.П. Ефремова»².

E-mail: igor.groshkov@mail.ru¹Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, Карачаровское ш., д. 2.²Адрес: 121357, Российская Федерация, г. Москва, ул. Верейская, д. 41, стр. 2.

Аннотация: В статье описана методика проектирования формирователя высокочастотных сигналов на основе высокоскоростных ЦАП для когерентных доплеровских радиосистем. Разработан алгоритм частотного планирования, позволяющий на основе заданных требований определить параметры формирователей когерентных сигналов. Представлена программа расчёта параметров для реализации многоканальной когерентной радиосистемы, построенной на основе высокоскоростных ЦАП, использующих специальные режимы работы.

Ключевые слова: частотное планирование, формирователи сигналов, высокоскоростные цифроаналоговые преобразователи, образы основной частоты, когерентные доплеровские системы.

Введение

При проектировании радиотехнических систем одной из основных задач является формирование стабильных высокочастотных сигналов с возможностью реализации различных видов модуляции. Общие вопросы синтеза частот рассматриваются в [1–3] и многих других работах. В доплеровских радиосистемах необходимо обеспечить не только генерацию непрерывных стабильных колебаний, но и формирование когерентных сложно-модулированных радиосигналов с возможностью перестройки несущей частоты. При построении когерентной радиосистемы помимо выбора параметров радиосигнала необходимо определить структуру передатчика и гетеродина приёмника, которая позволит сохранить постоянные фазовые соотношения формируемых сигналов при всех преобразованиях частоты в приёмном тракте [4, 5]. Для построения таких радиосистем целесообразно использовать многокаскадную структуру радиопередающего устройства (РПУ) с комбинированием различных методов синтеза частот [4].

Для формирования сигналов передатчика и гетеродина в настоящее время широко используется метод прямого цифрового синтеза на основе высокоскоростных ЦАП [6–8]. Данный метод позволяет значительно унифицировать конструкцию и расширить функционал аппаратуры за счёт возможности оперативно управлять параметрами сигналов. Однако одним из основных недостатков прямого цифрового синтеза является относительно низкая выходная частота, которая может быть увеличена за счёт использования смесителей или умножителей частоты. Другим возможным вариантом преобразования частоты является использование побочных составляющих спектра сигнала формируемого на выходе ЦАП — образов (англ. image) [9]. Особенности структуры современных высокоскоростных ЦАП позволяют реализовать специальные режимы [7–10], в которых амплитуда образов увеличивается, что позволяет снизить общий коэффициент усиления, уменьшив количество усилительных каскадов. Таким образом, для реализации когерентной радиосистемы на основе высокоскоростных

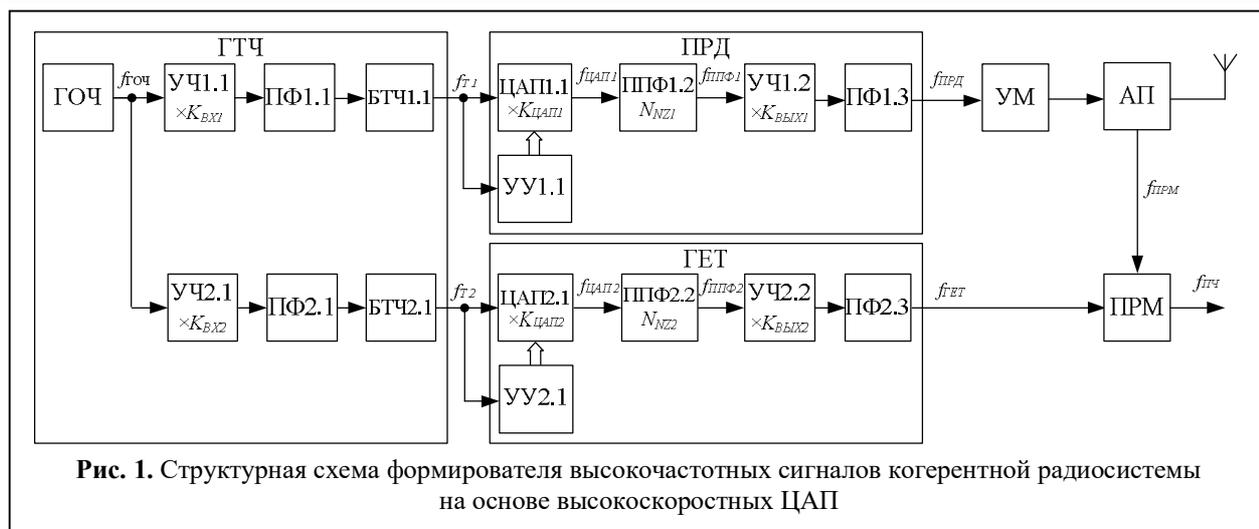


Рис. 1. Структурная схема формирователя высокочастотных сигналов когерентной радиосистемы на основе высокоскоростных ЦАП

ЦАП необходимо провести частотное планирование, в ходе которого будут определены параметры формирователя сигналов приёмопередающей системы с учётом изменения амплитуды сигнала в различных режимах работы.

Реализация алгоритма частотного планирования формирователя высокочастотных сигналов когерентной радиосистемы на основе высокоскоростных ЦАП

Как правило, аппаратура приёмопередающей системы включает в себя генератор опорного сигнала (ГОС), формирователь сигнала гетеродина (ФСГ), формирователь сигналов передатчика (ФСП) и выходной усилитель мощности (ВУМ) [4].

С учётом изложенных выше требований была разработана структурная схема формирователя сигналов когерентной радиосистемы, представленная на рис. 1.

На рисунке приведены следующие обозначения: ГОЧ — генератор опорной частоты; УЧ — умножители частоты с коэффициентами $K_{ВХi}$, $K_{ВЫХi}$, где i — номер канала (1 для передатчика, 2 для гетеродина); ПФ — полосовые фильтры умножителей частоты; БТЧ — буфер тактовой частоты; УУ — устройства управления; ЦАП — цифро-аналоговые преобразователи с коэффициентами преобразования тактовой частоты $K_{ЦАПi}$, значение которых определяется по формуле (1)

$$K_{ЦАПi} = f_{ЦАПi} / f_{ГТi}, \quad (1)$$

где $f_{ЦАПi}$ — частота сигнала на выходе ЦАП i -го канала, $f_{ГТi}$ — частота тактирования ЦАП i -го канала; ППФ — полосно-пропускающие фильтры для выделения спектральной составляющей в зоне Найквиста с номером N_{NZi} ; УМ — усилитель мощности; АП — антенный переключатель; ПРМ — приёмное устройство.

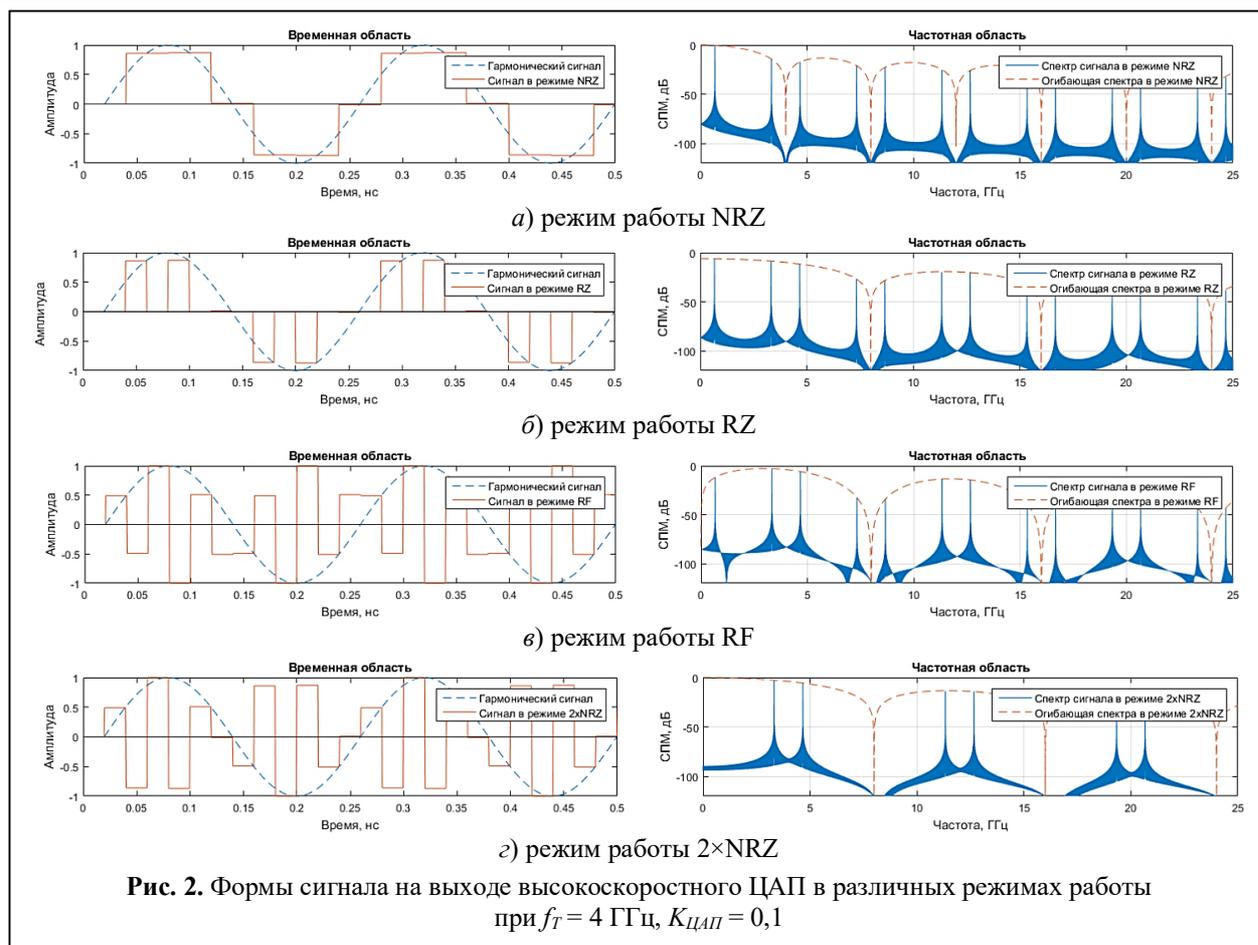
Генератор тактовых частот (ГТЧ), построенный на основе общей опорной частоты, позволяет обеспечить истинную когерентность передающего и приёмного тракта. Частота ГОЧ $f_{ГОЧ}$ умножается на коэффициент $K_{ВХi}$, фильтруется и преобразуется БТЧ в тактовые сигналы с частотами $f_{ГТi}$. Тактовые сигналы подаются на формирователи сигналов передатчика (ПРД) и гетеродина (ГЕТ) и используются для тактирования цифрового УУ и ЦАП. Частота сигналов на выходах ЦАП $f_{ЦАПi}$ может быть увеличена за счёт использования образов до значения $f_{ПФi}$ с последующим умножением на коэффициент $K_{ВЫХi}$ для получения частот $f_{ПРД}$, $f_{ГЕТ}$, соответственно. Сигнал передатчика усиливается УМ и через АП подаётся на антенну.

В доплеровских радиосистемах принимаемый сигнал содержит информацию о параметрах движущегося объекта и будет иметь частоту

$$f_{ПРМ} = f_{ПРД} \pm \Delta f_{доп}, \quad (2)$$

где $\Delta f_{доп}$ — доплеровское изменение частоты.

Посредством АП принимаемый сигнал подаётся на ПРМ, где переносится на промежуточную частоту $f_{ПЧ}$.



Радиосистема, структура которой приведена на рис. 1, может быть реализована при различных комбинациях коэффициентов $K_{ВХi}$, $K_{ВЫХi}$, N_{NZi} , $K_{ЦАП}$. Кроме того, для преобразования частоты ПРМ может использовать суммарную или разностную (относительно частоты гетеродина) составляющую спектра. Таким образом, реализация предложенной радиосистемы требует проведения частотного планирования, в ходе которого будут определены параметры, при которых возможен синтез требуемых частот.

В литературе [1, 11, 12] описаны алгоритмы, позволяющие определить параметры формирователя для когерентного синтеза частот при использовании образов основной частоты ЦВС, однако имеющиеся алгоритмы не позволяют рассчитать сетку частот формирователя сигналов с учётом преобразования частоты в смесителе приёмного устройства. Также при выборе частотного плана необходимо учитывать изменение амплитуды сигнала на выходе

высокоскоростного ЦАП в зависимости от режима работы [6–8]. Так, амплитуда спектральных составляющих на выходе высокоскоростного ЦАП AD9164 в режимах работы без возврата к нулю (non return to zero — NRZ), с возвратом к нулю (return to zero — NRZ), в режиме радиочастоты (Radio Frequency — RF) и в режиме удвоения тактовой частоты (2×NRZ) может изменяться более чем на 10 дБ. Формы сигнала на выходе высокоскоростного ЦАП в различных режимах работы при $f_T = 4$ ГГц, $K_{ЦАП} = 0,1$ во временной и частотной областях при приведены на рис. 2.

Полные выражения для расчёта амплитуды сигнала на выходе ЦАП в специальных режимах работы известны и приводятся в [7–10]. При дискретизации тактовых импульсов $q = 2$ определить амплитуду сигнала на выходе ЦАП в режимах работы NRZ, RZ, RF, 2×NRZ возможно по обобщённому выражению

Таблица 1. Значения корректирующих коэффициентов амплитуды сигнала на выходе ЦАП в режимах работы NRZ, RZ, RF, 2×NRZ при $q = 2$

Режим работы	Значение коэффициента		
	k_{RZ}	k_{RF}	$k_{2 \times NRZ}$
NRZ	1	1	1
RZ	2	1	1
RF	2	2	1
2×NRZ	1	1	$2 \cdot \left\lfloor \frac{N_{NZi}}{2} \right\rfloor - 4 \cdot \left\lfloor \frac{N_{NZi}}{4} \right\rfloor$

$$A_{ЦАП}(f_{ЦАП}) = A_0 \cdot k_{2 \times NRZ} \cdot k_{RF} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot f_{ЦАП}}{f_T \cdot k_{2 \times NRZ} \cdot k_{RZ}}\right)^{k_{RF}}}{\frac{\pi \cdot f_{ЦАП}}{f_T}}$$

где A_0 — нормирующий амплитудный коэффициент; $f_{ЦАП}$ — частота сигнала на выходе ЦАП; f_T — частота тактирования ЦАП; k_{RZ} , k_{RF} , $k_{2 \times NRZ}$ — корректирующие коэффициенты, значение которых в различных режимах работы определяется в соответствии с таблицей 1.

Для расчёта параметров формирователей сигналов передатчика и гетеродина с учётом указанных выше требований предлагается алгоритм частотного планирования формирователя высокочастотных сигналов когерентной радиосистемы на основе высокоскоростных ЦАП, который включает в себя несколько этапов, описанных ниже.

1. Для работы алгоритма необходимо задать частоту опорного генератора ($f_{ГОЧ}$), минимальную и максимальную частоты передатчика ($f_{ПРД\ MIN/MAX}$), частоту сигнала на выходе приёмного устройства ($f_{ПЧ}$). В зависимости от параметров используемой элементной базы устанавливаются ограничения минимальной и максимальной тактовых частот ЦАП ($f_{Ti\ MIN/MAX}$), диапазона коэффициентов умножения входных ($K_{ВХi\ MIN/MAX}$) и выходных ($K_{ВЫХi\ MIN/MAX}$) умножителей частоты, а также задаются номера зон Найквиста ($N_{NZi\ MIN/MAX}$), для которых необходимо провести расчёт.

Возможность выделения побочных составляющих из спектра на выходе ЦАП будет определяться характеристиками ППФ. Поэтому необходимо опреде-

лить отношения максимальной и минимальной частот полосы пропускания ППФ ($f_{ППФ\ MIN/MAX}$) к тактовой частоте ЦАП для каждой зоны Найквиста. Представить это отношение можно через коэффициент $B_{ППФ\ MIN/MAX}$, исходя из условий (3) и (4) соответственно:

$$B_{ППФ\ MIN} = \begin{cases} 0, & \text{при } n_{ОБР} = 0; \\ \frac{f_{ППФ\ MIN}}{f_{ГОЧ} \cdot K_{ВХi}} - n_{ОБР}, & \text{при } n_{ОБР} > 0; \\ |n_{ОБР}| - \frac{f_{ППФ\ MAX}}{f_{ГОЧ} \cdot K_{ВХi}}, & \text{при } n_{ОБР} < 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$B_{ППФ\ MAX} = \begin{cases} \frac{f_{ППФ\ MAX}}{f_{ГОЧ} \cdot K_{ВХi}} - n_{ОБР}, & \text{при } n_{ОБР} \geq 0; \\ |n_{ОБР}| - \frac{f_{ППФ\ MIN}}{f_{ГОЧ} \cdot K_{ВХi}}, & \text{при } n_{ОБР} < 0; \end{cases} \quad (4)$$

где $n_{ОБР} = \left(2 \cdot \left(N_{NZi} - 2 \cdot \left\lfloor \frac{N_{NZi}}{2} \right\rfloor \right) - 1 \right) \cdot \left\lfloor \frac{N_{NZi}}{2} \right\rfloor$ — номер образа основной частоты [9].

На практике частота сигнала, формируемого на выходе ЦАП, составляет порядка 35% от тактовой частоты [3], а при использовании образцов не более 40% от ширины зоны Найквиста [11].

2. Проведение расчёта частот формирователя сигналов гетеродина, исходя из условия, что в приёмном устройстве происходит понижение частоты $f_{ПРМ}$ до значения $f_{ПЧ} \pm \Delta f_{доп}$. Диапазон выходных частот гетеродина будет определяться выражением (5), в котором знак минус будет соответствовать суммарной составляющей спектра основного канала приёма, а знак минус — разностной составляющей соответственно:

$$f_{ГЕТ\ MIN, MAX} = f_{ПРД\ MIN, MAX} \pm f_{ПЧ}. \quad (5)$$

3. Исключение недопустимых коэффициентов умножения входных умножителей частоты с учётом допустимого диапазона тактовых частот ЦАП, в соответствии с выражением

$$\min\left(\left[\frac{f_{Ti\ MAX}}{f_{ГОЧ}}\right], K_{ВХi\ MAX}\right) \leq K_{ВХi} \leq \max\left(\left[\frac{f_{Ti\ MIN}}{f_{ГОЧ}}\right], K_{ВХi\ MIN}\right), \quad (6)$$

где $max()$, $min()$ — функции нахождения наибольшего и наименьшего значения из двух

аргументов соответственно.

4. Расчёт коэффициентов $K_{ЦАПi\ MIN}$ и $K_{ЦАПi\ MAX}$ для каждой зоны Найквиста при всех возможных комбинациях коэффициентов умножения входных и выходных умножителей частот на основе выражений (7, 8), соответственно

$$K_{ЦАПi\ MIN} = \begin{cases} \frac{f_{i\ MIN}}{f_{ГОЧ} \cdot K_{ВХi} \cdot K_{ВЫХi}} - n_{ОБР}, & \text{при } n_{ОБР} \geq 0; \\ |n_{ОБР}| - \frac{f_{i\ MIN}}{f_{ГОЧ} \cdot K_{ВХi} \cdot K_{ВЫХi}}, & \text{при } n_{ОБР} < 0; \end{cases} \quad (7)$$

$$K_{ЦАПi\ MAX} = \begin{cases} \frac{f_{i\ MAX}}{f_{ГОЧ} \cdot K_{ВХi} \cdot K_{ВЫХi}} - n_{ОБР}, & \text{при } n_{ОБР} \geq 0; \\ |n_{ОБР}| - \frac{f_{i\ MAX}}{f_{ГОЧ} \cdot K_{ВХi} \cdot K_{ВЫХi}}, & \text{при } n_{ОБР} < 0; \end{cases} \quad (8)$$

где $f_{i\ MIN, MAX} = \begin{cases} f_{ПРД\ MIN, MAX}, & \text{при } i = 1, \\ f_{ГЕТ\ MIN, MAX}, & \text{при } i = 2, \end{cases}$

$K_{ВХi} = K_{ВХi\ MIN}, K_{ВХi\ MIN} + 1, \dots, K_{ВХi\ MAX}$ — массив коэффициентов умножения входных умножителей частот; $K_{ВЫХi} = K_{ВЫХi\ MIN}, K_{ВЫХi\ MIN} + 1, \dots, K_{ВЫХi\ MAX}$ — массив коэффициентов умножения выходных умножителей частот.

5. Проверка соответствия коэффициентов $K_{ЦАПi\ MIN}$ и $K_{ЦАПi\ MAX}$ условию:

$$(K_{ЦАПi\ MIN} \geq B_{ППФ\ MIN}) \wedge (K_{ЦАПi\ MAX} \leq B_{ППФ\ MAX}). \quad (9)$$

Если условие (9) не выполняется, то это го-

ворит о невозможности реализации формирователя сигналов при текущей комбинации зоны Найквиста и коэффициентов умножения частот. При выполнении условия (9) формирование требуемого диапазона частот с возможностью фильтрации побочных составляющих спектра осуществимо, и текущая комбинация параметров формирователя сигналов заносится в таблицу возможных вариантов частотного плана.

6. В результате выполнения алгоритма будут получены варианты частотного плана, представляющие собой набор параметров, позволяющих реализовать формирователи когерентных сигналов на основе высокоскоростных ЦАП. Выбор конкретного варианта частотного плана будет зависеть от сложности технической реализации, наличия интермодуляционных составляющих в рабочей полосе частот, а также от амплитуды сигнала на выходе высокоскоростного ЦАП, которая в значительной степени будет определяться его режимом работы.

Программа расчёта параметров многоканальной когерентной радиосистемы на основе высокоскоростных ЦАП

Для автоматизации расчёта параметров синтезаторов частот при проектировании многока-

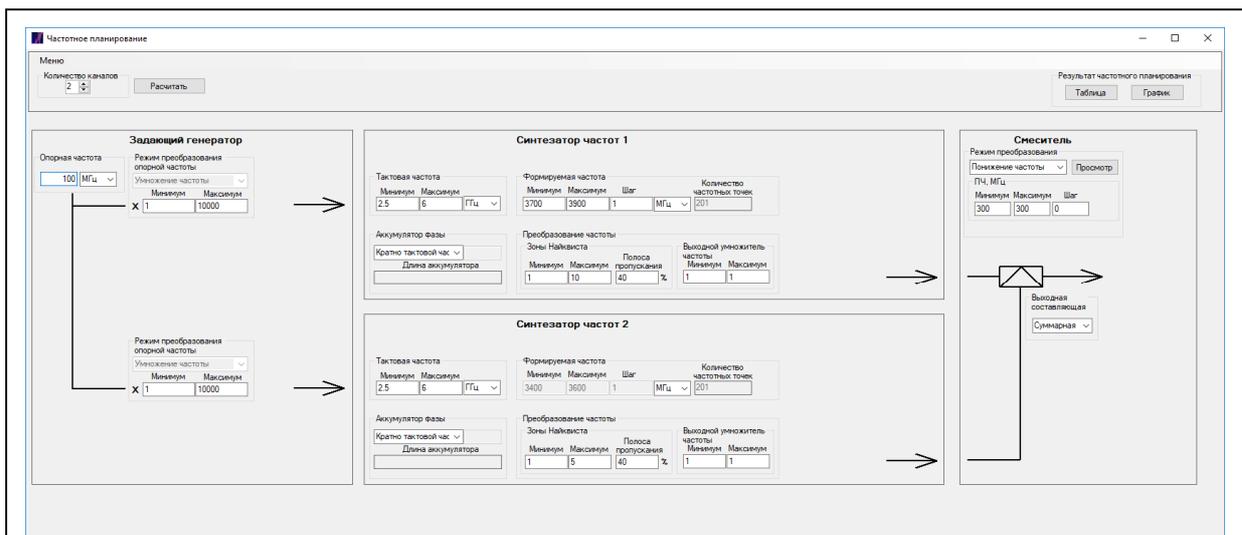


Рис. 3. Главное окно программы расчёта параметров многоканальной когерентной радиосистемы на основе высокоскоростных ЦАП

№	Частота опорного генератора	Коэффициент умножения опорной частоты	Тактовая частота	Квант мин	Квант макс	Частота на выходе ЦАП минимальная	Частота на выходе ЦАП максимальная	Зона Найквиста	Частота образа минимальная	Частота образа максимальная	Коэффициент умножения выходного умножителя частоты	Формируемая частота минимальная	Формируемая частота максимальная	Минимальная нормированная амплитуда сигнала	Неравномерность амплитуды, dB	Оптимальный режим работы ЦАП	Амплитуда сигнала в оптимальном режиме работы ЦАП
1	100	46	4600	0.152179913	0.196652173	700	900	2	3700	3900	1	3700	3900	0.17273	2.41959	2nNRZ	0.72953
2	100	47	4700	0.170212765	0.212765957	800	1000	2	3700	3900	1	3700	3900	0.19549	2.15671	2nNRZ	0.73995
3	100	48	4800	0.1875	0.229166666	900	1100	2	3700	3900	1	3700	3900	0.21765	1.94474	2nNRZ	0.74879
4	100	49	4900	0.204081632	0.244897959	1000	1200	2	3700	3900	1	3700	3900	0.2392	1.76985	2nNRZ	0.75911
5	100	50	5000	0.219999999	0.26	1100	1300	2	3700	3900	1	3700	3900	0.26013	1.62287	2nNRZ	0.76793
6	100	51	5100	0.235294117	0.274509803	1200	1400	2	3700	3900	1	3700	3900	0.28043	1.49745	2nNRZ	0.77628
7	100	52	5200	0.25	0.288461538	1300	1500	2	3700	3900	1	3700	3900	0.30011	1.38908	2nNRZ	0.78421
8	100	53	5300	0.264150943	0.30186792	1400	1600	2	3700	3900	1	3700	3900	0.31917	1.29442	2nNRZ	0.79174
9	100	54	5400	0.277777777	0.314814814	1500	1700	2	3700	3900	1	3700	3900	0.33762	1.21098	2nNRZ	0.79888
10	100	55	5500	0.290909090	0.327272727	1600	1800	2	3700	3900	1	3700	3900	0.35548	1.13684	2nNRZ	0.80568
11	100	56	5600	0.303571428	0.339285714	1700	1900	2	3700	3900	1	3700	3900	0.37276	1.07051	2nNRZ	0.81214
12	100	29	2900	0.275862068	0.344827586	800	1000	3	3700	3900	1	3700	3900	0.19015	0.82605	2nNRZ	0.40562
13	100	30	3000	0.233333333	0.300000000	700	900	3	3700	3900	1	3700	3900	0.1727	1.19168	2nNRZ	0.46333
14	100	31	3100	0.193548387	0.259064516	600	800	3	3700	3900	1	3700	3900	0.15235	1.61022	2nNRZ	0.46502
15	100	32	3200	0.15625	0.21875	500	700	3	3700	3900	1	3700	3900	0.12977	2.12218	2nNRZ	0.49182

Рис. 4. Таблица с результатами расчёта частотного плана формирователя сигналов передатчика

№	Частота опорного генератора	Коэффициент умножения опорной частоты	Тактовая частота	Квант мин	Квант макс	Частота на выходе ЦАП минимальная	Частота на выходе ЦАП максимальная	Зона Найквиста	Частота образа минимальная	Частота образа максимальная	Коэффициент умножения выходного умножителя частоты	Формируемая частота минимальная	Формируемая частота максимальная	Минимальная нормированная амплитуда сигнала	Неравномерность амплитуды, dB	Оптимальный режим работы ЦАП	Амплитуда сигнала в оптимальном режиме работы ЦАП
1	100	43	4300	0.162790697	0.209302325	700	900	2	3400	3600	1	3400	3600	0.18508	2.42617	2nNRZ	0.73568
2	100	44	4400	0.181818181	0.227272727	800	1000	2	3400	3600	1	3400	3600	0.21033	2.16127	2nNRZ	0.74657
3	100	45	4500	0.199999999	0.244444444	900	1100	2	3400	3600	1	3400	3600	0.23387	1.94752	2nNRZ	0.75683
4	100	46	4600	0.217391304	0.260898565	1000	1200	2	3400	3600	1	3400	3600	0.25668	1.77107	2nNRZ	0.76549
5	100	47	4700	0.234042553	0.276595744	1100	1300	2	3400	3600	1	3400	3600	0.27876	1.62272	2nNRZ	0.7756
6	100	48	4800	0.25	0.291666666	1200	1400	2	3400	3600	1	3400	3600	0.30011	1.4961	2nNRZ	0.78421
7	100	49	4900	0.265306122	0.306122448	1300	1500	2	3400	3600	1	3400	3600	0.32073	1.38668	2nNRZ	0.79235
8	100	50	5000	0.28	0.319999999	1400	1600	2	3400	3600	1	3400	3600	0.34064	1.29109	2nNRZ	0.80004
9	100	51	5100	0.294117647	0.333333333	1500	1700	2	3400	3600	1	3400	3600	0.35986	1.20684	2nNRZ	0.80733
10	100	52	5200	0.307692307	0.346153846	1600	1800	2	3400	3600	1	3400	3600	0.37839	1.13199	2nNRZ	0.81423
11	100	27	2700	0.259259259	0.333333333	700	900	3	3400	3600	1	3400	3600	0.18386	1.01899	2nNRZ	0.4135
12	100	28	2800	0.214285714	0.285714285	600	800	3	3400	3600	1	3400	3600	0.16344	1.4692	2nNRZ	0.44612
13	100	29	2900	0.172413793	0.241379310	500	700	3	3400	3600	1	3400	3600	0.13997	2.00602	2nNRZ	0.47641

Рис. 5. Таблица с результатами расчёта частотного плана формирователя сигналов гетеродина

нальных радиосистем в соответствии с предложенным алгоритмом частотного планирования была разработана программа, реализованная на языке программирования C# [13]. Вид главного окна программы представлен на рис. 3.

Программа позволяет задать количество каналов синтеза частот $i \leq 4$, для которых будет проведён расчёт параметров, а также ввести исходные данные отдельно для каждого канала. Частота опорного генератора и режим её преобразования указываются в блоке “Задающий генератор”. Параметры формируемого сигнала указываются в блоках “Синтезатор частот i ” каждого канала. Для расчёта частот гетеродина с учётом преобразования частоты в приёмном устройстве необходимо в блоке

«Смеситель» указать режим преобразования с понижением частоты и выбрать суммарную или разностную выходную составляющую в качестве основного канала приёма. В блоке «Смеситель» программы также доступен режим преобразования с повышением частоты, позволяющий рассчитать параметры формирователя сигнала промежуточной частоты относительно частоты гетеродина.

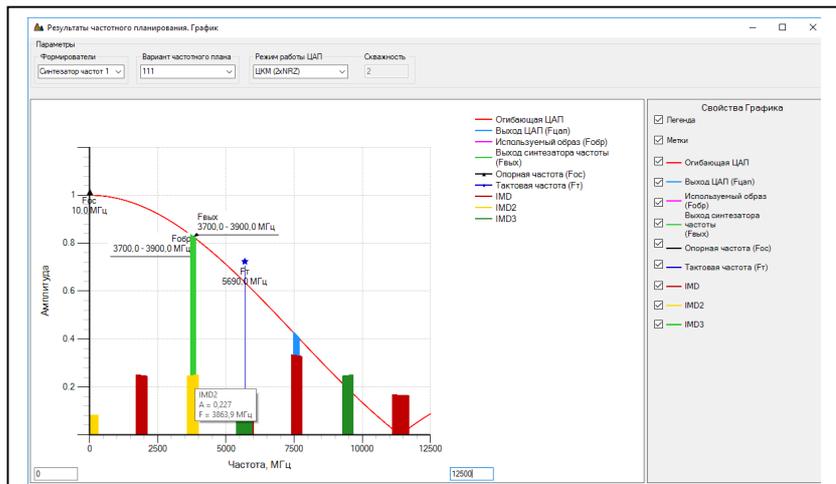
Программа вычисляет уровень амплитуды сигнала на выходе формирователя для каждого варианта частотного плана в четырёх режимах работы ЦАП и определяет оптимальный режим с максимальным значением амплитуды. После проведения расчёта можно выбрать режим работы ЦАП отдельно для каждого варианта частотного плана.

Результаты расчёта могут быть представлены в виде таблицы параметров для каждого синтезатора частот, либо в виде диаграммы распределения частот с в заданном режиме работы высокоскоростного ЦАП.

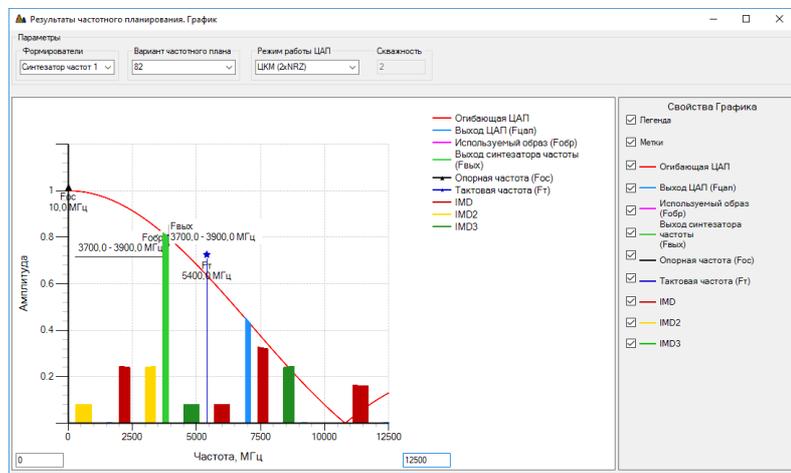
На рис. 4 и 5 приведены таблицы с результатами расчёта частотного плана формирователя сигналов передатчика с диапазоном частот от 3700 до 3900 МГц, а также гетеродина для преобразования с понижением частоты до 300 МГц из суммарной составляющей спектра.

При вводе исходного значения опорной частоты 100 МГц доступно 15 вариантов реализации передатчика и 13 вариантов реализации гетеродина без использования выходного множителя.

Рассмотрим выбор вариантов реализации на примере формирователя сигнала передатчика — синтезатор частот 1. Оптимальным вариантом, с точки зрения максимизации амплитуды, является вариант, использующий спектральную составляющую во второй зоне Найквиста в режиме работы 2xNRZ при тактовой частоте 5600 МГц, поскольку для него нормированная амплитуда максимальна и составляет 0,812 при неравномерности в полосе формируемых частот 0,19 дБ. При опорной частоте 10 МГц существует 144 варианта реализации без использования выходного множителя частоты, с максимальной амплитудой 0,818 и неравномерностью 0,18 дБ при использовании второго образа в режиме работы 2xNRZ с тактовой частотой 5690 МГц. Таким образом, снижение шага опорной частоты позволяет осуществить более детальный анализ



а) при $f_T = 5690$ МГц



б) при $f_T = 5400$ МГц

Рис. 6. Окно программы с диаграммами распределения сигналов в частотной области в режиме работы 2xNRZ

параметров схемы формирователя.

На рис. 6 приведены окна программы с диаграммами распределения сигналов в частотной области для режима работы 2xNRZ при тактовой частоте 5690 МГц и 5400 МГц.

На диаграммах приводятся следующие частоты:

- диапазон частот на выходе ЦАП с образами основной частоты: $F_{ЦАП} = f_{ЦАП}$;
- диапазон частот используемого образа: $F_{ОБР} = n_{ОБР} \cdot f_T \pm f_{ЦАП}$;
- диапазон частот на выходе синтезатора частот: $F_{ВЫХ} = f_{ПРД}(f_{ГЕТ})$;
- частота опорного генератора: $F_{ОС} = f_{ГОЧ}$;
- тактовая частота ЦАП: $F_T = f_T$.

Кроме основных сигналов на диаграмме

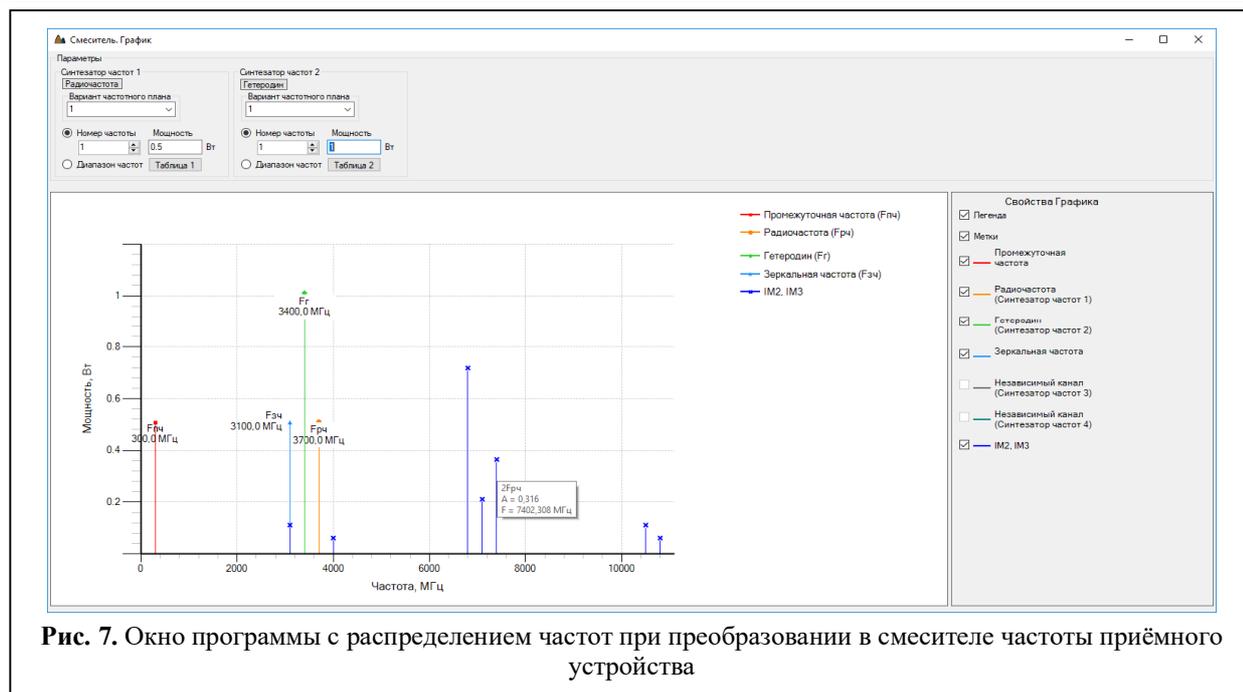


Рис. 7. Окно программы с распределением частот при преобразовании в смесителе частот приёмного устройства

также представлены интермодуляционные составляющие (ИС) различных порядков, обозначенные маркерами IMD, IMD2, IMD3. Маркеры отображают ИС со следующими частотами:

- IMD: $2f_{ЦАП}, 3f_{ЦАП}, f_T \pm 2f_{ЦАП}, f_T \pm 3f_{ЦАП}$;
- IMD2: $2f_T \pm 2f_{ЦАП}, 2f_T \pm 3f_{ЦАП}$;
- IMD3: $3f_T \pm 2f_{ЦАП}, 3f_T \pm 3f_{ЦАП}$.

Амплитуда ИС показана условно, т.к. она будет определяться характеристиками конкретного устройства [1, 3].

Поскольку в варианте частотного плана с тактовой частотой 5690 МГц в полосе рабочих частот присутствуют интермодуляционные составляющие IMD2, необходимо рассмотреть следующий вариант реализации с максимальной амплитудой. С достаточным уровнем фильтрации ИС могут быть реализованы варианты с тактовыми частотами от 5300 МГц до 5400 МГц с шагом 10 МГц, при этом максимально достижимая нормированная амплитуда 0.8 и неравномерность 0,2 дБ будут при $f_T = 5400$ МГц.

На рис. 7 представлено окно программы, в котором отображается распределение частот при преобразовании в смесителе частот приёмного устройства.

На диаграмме рис. 7 отображаются следующие частоты:

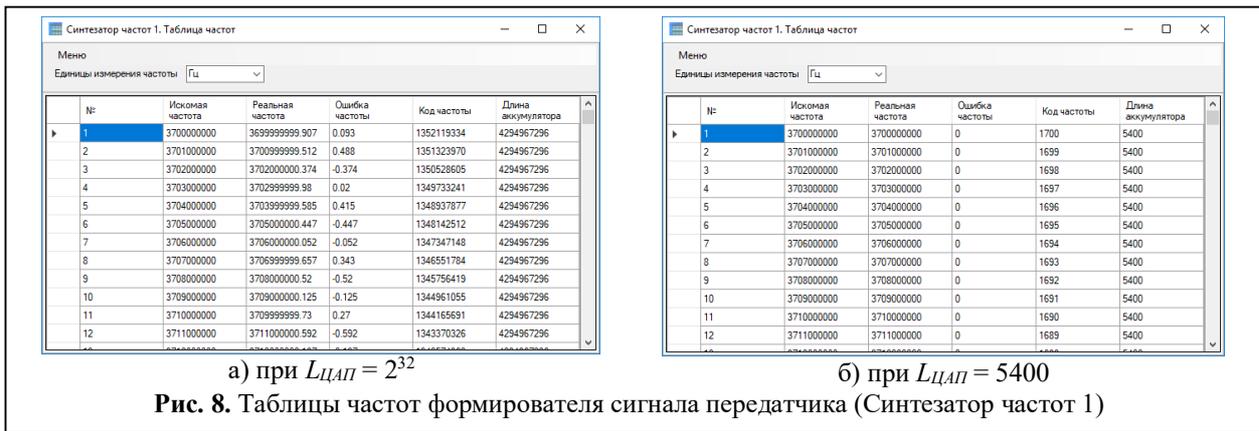
- частота сигнала передатчика (Синтезатор частот 1): $F_{рч}$;
- частота сигнала гетеродина (Синтезатор частот 2): $F_{г}$;
- частота приёма зеркального канала: $F_{зч}$;
- промежуточная частота преобразования: $F_{пч}$;
- интермодуляционные составляющие 2-го и 3-го порядков (IM2, IM3): $2F_{рч}, 2F_{г}, 2F_{г} \pm F_{рч}, 2F_{рч} \pm F_{г}$.

Также программа позволяет сформировать таблицу частот с учётом заданной длины аккумулятора фазы цифрового устройства управления ЦАП ($L_{ЦАП}$) [3], или рассчитать длину аккумулятора фазы кратно тактовой частоте в соответствии с выражением (10).

$$L_{ЦАП} = \left\lceil \frac{f_T}{НОД(f_{ЦАП\ MIN}, f_{ЦАП\ ШАГ})} \right\rceil, \quad (10)$$

где f_T — частота тактирования ЦАП; НОД() — функция определения наибольшего общего делителя двух чисел;

$f_{ЦАП\ MIN} = \left\lceil \frac{f_{СЧ\ MIN}}{K_{ВЫХ}} - f_T \cdot n_{ОБР} \right\rceil$ — минимальная частота формируемая на выходе ЦАП;



$f_{сч\min}$ — минимальная частота, формируемая на выходе синтезатора частот; $K_{в\text{ых}}$ — коэффициент умножения выходного умножителя частоты; $n_{обр}$ — номер образа основной частоты; $f_{ЦАП\ шаг} = \left| \frac{f_{сч\min} - f_{сч\max}}{(N-1) \cdot K_{в\text{ых}}} - f_T \cdot n_{обр} \right|$ —

шаг сетки частот, формируемых на выходе ЦАП; $f_{сч\max}$ — максимальная частота, формируемая на выходе синтезатора частот; N — количество частотных точек синтезатора частот.

На рис. 8 приведены таблицы частот формирователя сигнала передатчика (синтезатор частот 1) при длине аккумулятора фазы $L_{ЦАП} = 2^{32}$ (а) и $L_{ЦАП} = 5400$ (б).

Как видно из таблиц, приведённых на рис. 8, длина аккумулятора фазы, кратная тактовой частоте, позволяет избежать ошибок при формировании сетки частот и даёт возможность подобрать структуру цифрового устройства управления для синтеза полностью когерентных сигналов.

Вывод

Предложена обобщённая структурная схема когерентной радиосистемы на основе высокоскоростных ЦАП. Разработан алгоритм частотного планирования, позволяющий определить параметры формирователя сигналов для реализации когерентной радиосистемы на основе ЦАП, использующих специальные режимы работы. Представлена программа, позволяющая автоматизировать расчёт параметров синтезаторов частот при проектировании мно-

гоканальных радиосистем. Описана методика, позволяющая сократить время проектирования формирователей высокочастотных сигналов для когерентных доплеровских радиосистем при использовании высокоскоростных ЦАП в специальных режимах работы.

Литература

1. Манассевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование. М.: Связь, 1979. 384 с.
2. Chenakin A. Frequency Synthesizers: From Concept to Product. New York: Artech House, 2010. 235 p.
3. Vankka J. Digital Synthesizers and Transmitters for Software Radio. Netherlands, Springer, 2005. 335 p.
4. Тяпкин В.Н., Фомин А.Н., Гарин Е.Н. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. Красноярск: СФУ. 2011. 536 с.
5. Скольник М.И. Справочник по радиолокации. Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Книга 1. М.: Техносфера, 2014. 672 с.
6. Ромашов В.В., Грошников И.Д. Моделирование шумовых характеристик генераторов сигналов радиолокационных систем // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2020. Вып. 22. С. 10–14.
7. Храмов К.К., Ромашов В.В. Сравнительный анализ режимов работы быстродействующих ЦАП // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. №4. С. 44–54.
8. Chen S.Y., Kim N.S., Rabaey J.M. Multi-mode sub-Nyquist rate digital-to-analog conversion for direct waveform synthesis // IEEE Workshop on Signal Processing Systems. 2008. Pp. 112–117.
9. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Докторов А.Н. Оценка эффективности специальных режимов работы цифро-аналоговых преобразователей при формировании высокочастотных сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2024. № 2(54). С. 69–75.

10. Королёв А.В., Рыков С.Г. Анализ фазовых и амплитудных шумов многорежимных цифро-аналоговых преобразователей в режимах RZ, NRZ и RF // Радиотехника. 2024. Т. 88. №2. С. 4138–155.

11. Докторов, А.Н., Якименко К.А. Алгоритм частотного планирования формирователя сигналов на основе цифровых вычислительных синтезаторов в режиме образов основной частоты // Научный потенциал молодежи – будущее России: V Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. – Муром, 22 апр. 2013 г. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2013. С. 320–321.

12. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Программа расчета частотного плана формирователя сигналов, построенного на базе цифрового вычислительного синтезатора // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015610107, 2015.

13. Грошков И.Д. Программа расчета частотного плана формирователей когерентных радиосигналов на основе высокоскоростных цифро-аналоговых преобразователей // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025617592, 2025.

Поступила 10 июня 2025 г.

English

A METHODIC FOR DESIGNING COHERENT SIGNAL GENERATORS BASED ON HIGH-SPEED DACS.

Igor Dmitrievich Groshkov — Design Engineer of the 1st category, JSC «Murom Plant of Radio measuring Instruments»¹; Postgraduate Student, «Scientific and Educational Center of Aerospace Defense «Almaz — Antey» named after Academician V.P. Efremov»².

E-mail: igor.groshkov@mail.ru

¹Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Karacharovskoe Highway, 2.

²Address: 121357, Russian Federation, Moscow, Vereiskaya str., 41, building 2.

Abstract: When designing Doppler radio systems, there is a need to synthesize coherent, complexly modulated signals with the possibility of tuning the carrier frequency. The construction of such radio systems implies the generation of transmitter and heterodyne signals, which is possible based on the direct digital synthesis method using high-speed DACs operating in special modes. This article proposes a generalized block diagram of a coherent radio system based on high-speed DACs operating in one of four modes: NRZ, RZ, RF, 2×NRZ. A generalized expression is given for calculating the amplitude of the signal at the DAC output when operating in special modes with clock sampling $q = 2$. A frequency planning algorithm has been developed and described that allows determining the parameters of the signal generators of the transmitter and the heterodyne for implementing a coherent Doppler radio system. A program is presented that makes it possible to automate the calculation of the parameters of frequency synthesizers when designing multi-channel radio systems. The program allows you to enter initial data for calculating the parameters of four coherent frequency synthesis channels and output the calculation results in the form of a parameter table for each channel, or in the form of a frequency distribution diagram taking into account the amplitude of the signal in a given mode of operation of a high-speed DAC and the influence of intermodulation distortion. A method is proposed for selecting a specific variant of the frequency plan depending on the amplitude of the signal at the output of a high-speed DAC, the presence of modulation components in the operating frequency band, as well as the complexity of the technical implementation of the digital control device. The described technique makes it possible to reduce the design time of frequency synthesizers based on DACs operating in special modes for the implementation of coherent, Doppler radio systems.

Keywords: frequency planning, signal generators, high-speed digital-analog converters, fundamental frequency images, coherent Doppler systems.

References

1. *Manassevich V.* Synthesizers of frequencies. Theory and design. Moscow: Svyaz, 1979. 384 p.
2. *Chenakin A.* Frequency Synthesizers: From Concept to Product. New York: Artech House, 2010. 235 p.
3. *Vankka J.* Digital Synthesizers and Transmitters for Software Radio. Netherlands, Springer, 2005. 335 p.
4. *Тяпкин В.Н., Фомин А.Н., Гарин Е.Н.* Fundamentals of building radar stations of radio engineering troops. Krasnoyarsk: Sib. feder. Univ., 2011. 536 p.
5. *Skolnik M.I.* Handbook of radar. Translated from English under the general editorship of B.C. Verba. In 2 books. Book 1. Moscow: Tehnosfera, 2014. 672 p.

6. *Romashov V.V., Groshkov I.D.* Modeling of noise characteristics of signal generators of radar systems. Methods and devices of information transmission and processing. Vol. 22, 2020. Pp. 10–14.
7. *Khramov K.K., Romashov V.V.* Comparative analysis of operating modes of high-speed DACs. Radio engineering and telecommunication systems, 2018, No. 4. Pp. 44–54.
8. *Chen S.Y., Kim N.S., Rabaey J.M.* Multi-mode sub-Nyquist rate digital-to-analog conversion for direct waveform synthesis. IEEE Workshop on Signal Processing Systems, 2008. Pp. 112–117.
9. *Romashov V.V., Romashova L.V., Doktorov A.N.* Evaluation of the effectiveness of special modes of operation of digital-to-analog converters in the formation of high-frequency signals. Radio engineering and telecommunication systems, 2024. No. 2(54). Pp. 69–75.
10. *Korolev A.V., Rykov S.G.* Analysis of phase and amplitude noise of multimode digital-to-analog converters in RZ, NRZ and RF modes. Radio Engineering, 2024, Vol. 88, No. 2. Pp. 138–155.
11. *Doktorov A.N., Yakimenko K.A.* Algorithm of frequency planning of a signal generator based on digital computational synthesizers in the mode of images of the fundamental frequency. Scientific potential of youth – the future of Russia: V All-Russian scientific Zvorykin readings: collection of reports. Murom, April 22, 2013. Murom: CPI MI VISU, 2013. Pp. 320–321.
12. *Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N.* Program for calculating the frequency plan of a signal generator based on a digital computing synthesizer. Certificate of state registration of a computer program No. 2015610107, 2015.
13. *Groshkov I.D.* Program for calculating the frequency plan of coherent radio signal generators based on high-speed digital-to-analog converters. Certificate of state registration of the computer program No. 2025617592, 2025.