

Особенности применения многоканальных генераторов сигналов на примере приборов Nosean серии MSG5000

Часть 1

Н. Лемешко, д.т.н.¹, М. Горелкин²

УДК 535.131 | ВАК 2.2.2

Для тестирования современных радиосистем, требующих фазовой когерентности сигналов, применяют многоканальные генераторы (МКГ), построение которых связано с реализацией ряда специальных технических решений. В статье рассматриваются вопросы применения многоканальных генераторов сигналов, приводятся основные требования к ним, анализируются способы обеспечения фазовой когерентности формируемых сигналов. Представлена краткая информация о характеристиках и функциональных особенностях МКГ серии MSG5000 от компании Nosean, приведены примеры подготовки исходных данных для настройки МКГ, а также результаты экспериментальной оценки сохранения фазовых соотношений между сигналами этих приборов в режиме немодулированной несущей и импульсной модуляции.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие радиотехнических средств обусловлено двумя определяющими факторами. С одной стороны, построение информационных систем, в первую очередь, беспроводных и массового доступа, требует постоянно-го увеличения объема передаваемой информации, для чего необходимо повышение спектральной эффективности каналов связи и рациональное использование возможностей пространственного разделения и обработки сигналов. Примерами являются системы радиосвязи, использующие несколько приемных и передающих антенн (технология MIMO, multi input – multi output), и радиолокационные станции (РЛС), для которых реализуется пространственно-временная обработка за счет программного формирования множества диаграмм направленности. С другой стороны, существенной проблемой является определение выходных параметров названных типов радиосистем, определяющих эффективность их применения по назначению. Учитывая высокую стоимость проведения натурных испытаний, для их тестирования

обычно применяют многоканальную контрольно-измерительную аппаратуру.

Любая радиосистема, имеющая ряд приемных устройств с объединенной обработкой, при испытаниях требует создания некоторого количества радиосигналов, взаимосвязанных определенным образом и имитирующих некоторую эфирную или помеховую обстановку. Как правило, такие сигналы имеют одинаковый вид и характеристики модуляции, а иногда и качественный состав переносимой информации. Однако во многих случаях определяющими являются фазовые соотношения в сигнале. Так, например, если рассмотреть эхо-сигнал от группой цели, то он будет представлять собой совокупность смещенных по времени компонент с разными ослаблениями, но прообраз зондирующих импульсов для всех объектов остается одним и тем же. Аналогично, в сетях 4G/5G антенны базовых станций, работающих в режиме MIMO, формируют излучения с некоторыми фазовыми соотношениями, которые остаются постоянными, по крайней мере, в пределах цикла передачи данных.

Если взять два и более независимых генераторов и проанализировать свойства их сигналов при помощи современных средств измерений, то окажется, что даже при одних и тех же настройках модуляции, несущей частоте, передаваемых данных и прочих условиях фазовый сдвиг

¹ АО «Корпорация «Комета», начальник отдела, nlem83@mail.ru.

² ООО «РШ Тех», менеджер по продукту, mikhail.gorelkin@rsh-tech.ru.

между ними будет меняться во времени, что исключает их прямое применение для тестирования указанных выше типов радиосистем. В радиотехнике для характеристики фазовых соотношений между сигналами введены понятия когерентности и фазовой стабильности. Два сигнала считаются когерентными, если они имеют постоянный относительный фазовый сдвиг в любые моменты времени [1]. Равенство частот еще не означает фазовой когерентности сигналов, даже если они в точности совпадают. Это связано с тем, что некоррелированные фазовые шумы и дрейф фазы между сигналами приводят к изменению фазовых соотношений во времени. Если эти случайные вариации фазы значительны, то на некоторых промежутках времени сигналы теряют когерентность и могут неправильно обрабатываться. Если они используются при тестировании требовательных к этому радиосистем, то это приведет к некорректным результатам.

С другой стороны, когерентность вовсе не означает отсутствие фазовых искажений. Два когерентных сигнала могут иметь весьма ощутимый уровень фазового шума и дрейфа фазы, но когерентность будет сохраняться, пока они являются общими для обоих сигналов, и их фазы изменяются одинаковым образом. Грань между когерентными и некогерентными сигналами во многом условна: сигналы можно считать допустимо когерентными, если нестабильность разности фаз меньше установленного значения. Для современных многоканальных генераторов сигналов достижимая стабильность разности фаз между каналами составляет менее 1 градуса, что достаточно для тестирования большинства требующих когерентности радиосистем.

В качестве характеристики фазовой когерентности сигналов принято использовать коэффициент корреляции K , который рассчитывается следующим образом [2]:

$$K = \frac{|M(P_1 P_2) - M(P_1)M(P_2)|}{\sigma(P_1)\sigma(P_2)}, \quad (1)$$

где $M(*)$ – оператор математического ожидания, P_1, P_2 – параметры сигнала (в нашем случае это фазы), $\sigma(*)$ – стандартное отклонение параметра. Значение K лежит в интервале [0; 1].

Сигналы с $K=1$ считаются полностью когерентными, а сигналы с $K=0$ – полностью некогерентными. Ввиду того, что полностью когерентных с математической точки зрения систем и многоканальных генераторов не существует, понятие фазовой когерентности принято использовать для случаев, когда значение K близко к единице. Если же оно существенно меньше единицы, но между сигналами имеется корреляция по фазе, то такая генерация сигналов характеризуется как фазостабильная.

С точки зрения решения практических задач многоканальные генераторы должны не только обладать фазовой когерентностью, но и сохранять ее при любых допустимых

разностях фаз между каналами. Это важнейшее требование к многоканальным генераторам определяет их техническую сущность и является основной предпосылкой к их проектированию. Понятия фазовой когерентности, фазовой стабильности и управления фазой следует сопоставлять некоторому интервалу времени, поскольку нарушение условий генерации, появление дополнительных факторов нестабильности работы многоканальных генераторов способно лишить их сигналы таких фазовых свойств.

Обеспечение фазовой когерентности сигналов – это отдельная задача, встречающаяся как при проектировании радиосистем, так и при разработке средств их тестирования. В последнем случае к фазовой стабильности и управлению фазой предъявляются особые требования, поскольку свойства средств измерений не должны проявляться при тестировании радиосистем, иначе его результаты станут неопределенными.

К настоящему времени принятым в инженерном сообществе решением является построение многоканальных генераторов сигналов, в которых реализованы специальные схемы обеспечения когерентности. В рамках данной статьи мы будем ориентироваться на многоканальные генераторы (МКГ) Nosean серии MSG5000, как отвечающие жестким требованиям по качеству формируемых радиосигналов. Ввиду практической важности рассматриваемого вопроса вначале рассмотрим типовые области применения многоканальных генераторов радиосигналов и требования к ним.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С УПРАВЛЕНИЕМ ФАЗОЙ

Ниже дана характеристика областей применения многоканальных генераторов с управляемой фазой.

Разнесенный прием сигналов

Известно, что распространение электромагнитного излучения в условиях сложного рельефа местности приводит к появлению множества отраженных волн [3]. На их характер оказывает влияние диаграмма направленности передающей антенны, отражающая способность подстилающей поверхности, рельеф и др. В результате многолучевого распространения в области расположения одиночной приемной антенны появляются зоны высокой и низкой напряженности электромагнитного поля, отличие между которыми может достигать десятков децибел (рис. 1). Такие области возникают за счет статистически синфазного и противофазного сложения прямого и отраженных лучей.

При использовании двух и более антенн, разнесенных на обоснованное расстояние и установленных с учетом направления прихода основного луча, вероятность нахождения обеих антенн в области поля минимального

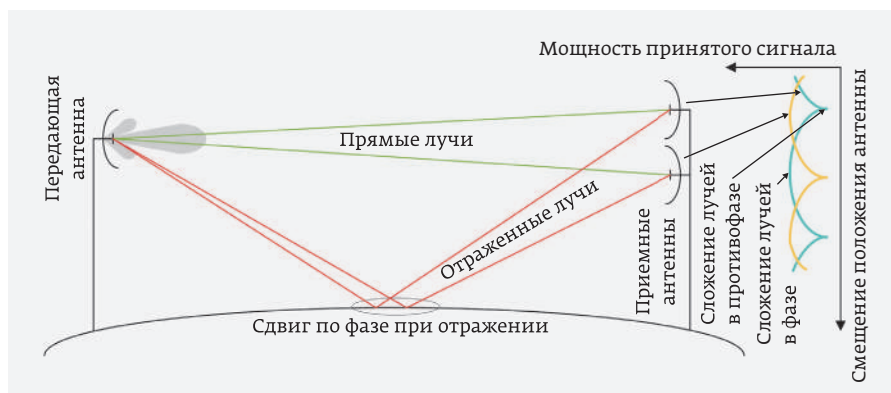


Рис. 1. Компенсация многолучевого распространения электромагнитных волн при разнесенном приеме

уровня резко снижается, даже если положение прямого и отраженных лучей является нестационарным. Подключенное к антеннам многоканальное приемное устройство может либо работать с сигналом максимального уровня, либо когерентно суммировать их для дальнейшей обработки. Переключение или комбинирование сигналов может иметь место на высокой или промежуточной частоте либо при цифровой обработке сигнала. Это требует наличия нескольких линейных трактов, которые должны быть фазостабильными по отношению друг к другу, если не полностью когерентными.

Таким образом, в данном применении МКГ могут имитировать сигналы, формируемые приемными антеннами в условиях заданной конфигурации трасс распространения электромагнитных волн. Если же необходимо имитировать одиночную трассу сложной конфигурации, например, проходящую через городскую застройку, то для этого должна использоваться специальная функция фединга (fading), реализуемая, например, в генераторах тестовых телевизионных сигналов DVB-T2 [4]. При надлежащем подходе каждый сигнал на выходе МКГ может быть сформирован с учетом индивидуального фединга.

Радиосистемы с многими входами и многими выходами (MIMO)

MIMO-системы используют многолучевое распространение электромагнитных волн для повышения эффективности использования частотного ресурса. За счет пространственно-временного кодирования передаваемые данные представляются таким образом, что приемник может разделять и обрабатывать сигналы в многолучевых каналах с однозначным выделением данных так, как если бы они передавались на разных частотах. Для этого системы MIMO обычно используют математически строгие алгоритмы оценки характеристик каналов распространения

сигналов, реализуемые сигнальным процессором (рис. 2). Для этого необходимо использовать фазо-стабильные или фазо-когерентные передающие и приемные тракты. Для парирования межсимвольных искажений из-за многолучевого распространения системы MIMO обычно используют виды модуляции с повышенной длительностью передачи символов и большим количеством несущих (OFDM), а также циклический префикс – повтор фрагмента передаваемой информации в конце пакета. При этом ясно, что передатчики в системе MIMO являются фазо-когерентными, иначе такая обработка

в приемнике станет невозможной.

В случае систем MIMO многоканальные генераторы могут имитировать как выходные сигналы передатчика, так и входные сигналы приемника. Если приемник MIMO подвергается глубокому тестированию, то один или несколько каналов МКГ могут быть использованы для создания аналогов сигналов гетеродинов с тем, чтобы на основе измерений получить показатели качества обработки сигналов вне влияния стабильности гетеродинов приемника.

Фазированные антенные решетки (ФАР)

ФАР отличаются способностью формировать диаграмму направленности с узким основным лепестком. Для современных ФАР достижимы диаграммы направленности и шириной луча менее градуса. Для формирования излучения со столь узкой диаграммой направленности и в заданном направлении излучатели должны возбуждаться напряжениями или токами с надлежащим

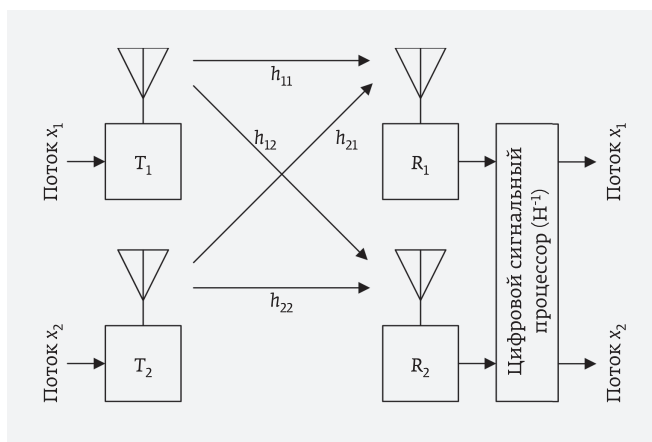


Рис. 2. Реализация системы MIMO (2×2)

фазовым сдвигом и амплитудой (рис. 3). Для этого в линейном тракте ФАР устанавливаются управляемые фазовращатели и аттенюаторы, задающие заранее рассчитанное амплитудно-фазовое распределение по раскрытию антенны.

Для систем, в которых используются ФАР, фазокогерентные МКГ могут использоваться в качестве имитаторов сигналов, поступающих с распределительной системы либо на излучатели передающих ФАР, либо на входы их оконечных усилителей. Для ФАР, содержащих многие сотни излучающих элементов, эта задача может быть решена путем объединения МКГ в единую сеть методами, сохраняющими общую когерентность, что часто является опцией таких приборов. Также МКГ могут использоваться для имитации сигналов на входах совокупности приемников ФАР для проверки линейных трактов и алгоритмов обработки сигналов. Это особенно важно, например, для стендовой отработки РЛС, полигонные испытания которых весьма затратны по времени и средствам.

Многостанционный доступ с пространственным разделением каналов (SDMA)

SDMA-системы (space division multiple access) являются частным применением ФАР. В таких радиосистемах с помощью ФАР формируется диаграмма направленности, имеющая несколько возможных угловых положений, индивидуальных для каждого абонента (рис. 4). Это позволяет использовать одну частоту для поочередной связи со всеми приемниками. Системы с SDMA применяются в основном в сфере закрытой радиосвязи, часто их функциональность дополняется расширением спектра и реализацией псевдослучайной перестройки несущей частоты [5]. Тестирование систем с SDMA также требует использования когерентных радиосигналов, а МКГ могут здесь применяться также, как и для отработки, настройки и сервисного обслуживания ФАР.

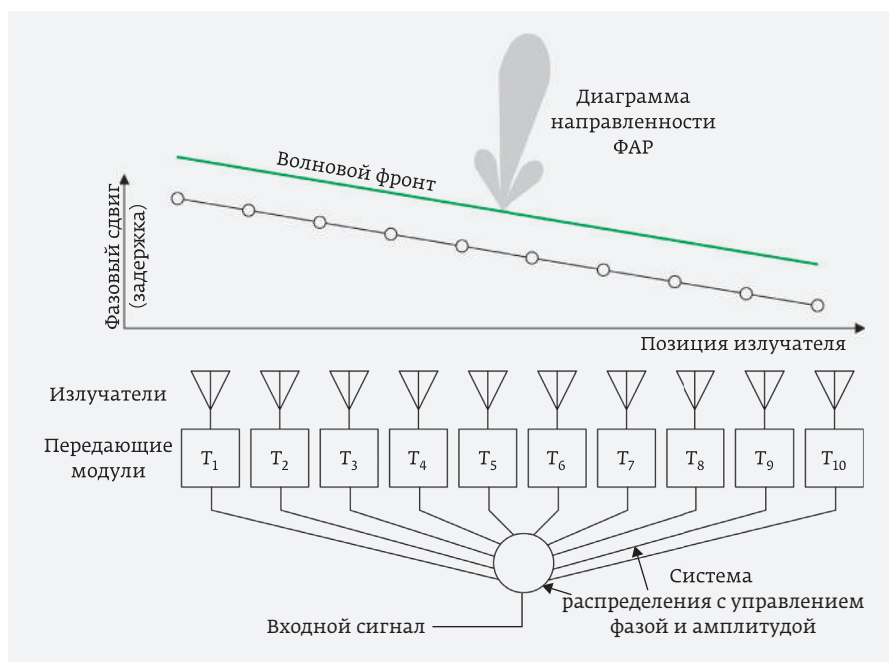


Рис. 3. Принцип формирования волнового фронта ФАР для линейной системы излучателей

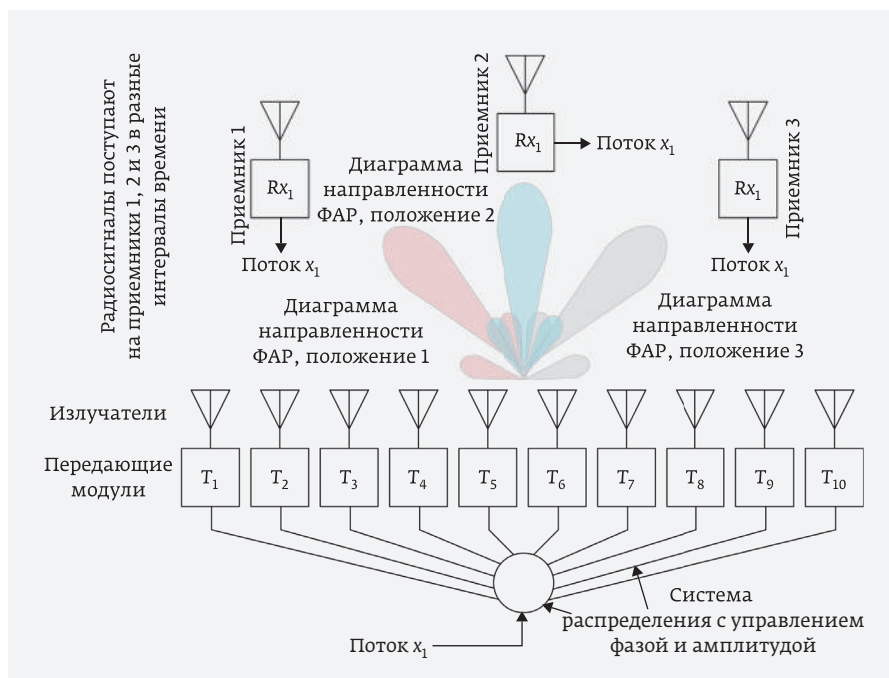


Рис. 4. Принцип построения системы SDMA с использованием ФАР

Фазовая интерферометрия

Когерентные сигналы и когерентная обработка широко используются в пеленгационных системах, которые предназначены для определения местоположения источников радиоизлучений [6].

Существует несколько способов определения местоположения источников радиоизлучений, использующих различные типы оборудования. Самый простой из них состоит в использовании управляемой антенны с узким лучом. Такой луч может быть сформирован с помощью ФАР, как это было описано выше, и тогда направление на источник излучения будет определяться по уровню максимального сигнала при угловом сканировании. Однако применение ФАР для этой задачи технически избыточно и экономически не всегда оправдано. Для однозначного определения положения искомого источника измерения должны выполняться с нескольких существенно разнесенных позиций, а далее применяется метод триангуляции [7].

Фазовая интерферометрия представляет собой другой подход к измерению угла прихода радиоизлучения (рис. 5). Для его реализации используются две всенаправленные антенны, разнесенные друг от друга на расстояние h и расположенные на одной высоте. Фазовый интерферометр вычисляет фазовый сдвиг ψ между сигналами на их выходах, создаваемый фронтом волны, и на основе его значения по известной частоте рассчитывается угол φ между соединяющей антенны прямой и направлением прихода радиоизлучения. С учетом обозначений на рис. 5 можно легко показать, что $\varphi = \arcsin(c\psi/2\pi fh)$, где c – скорость света в вакууме, f – частота пеленгации.

Для устранения неоднозначности определения искомого направления обычно используются три и более антенны с существенным пространственным и угловым разносом. Все они должны быть подключены к когерентным приемникам с низким уровнем фазового шума, линейные тракты которых должны быть выровнены по фазовым сдвигам на частоте измерений. Интерферометры при точной настройке способны обеспечить очень высокое угловое разрешение.

При тестировании радиосредств с фазовой интерферометрией МКГ позволяют имитировать сигналы на входах антенн, таким образом задавая любое необходимое направление прихода радиоизлучения с отслеживанием результатов пеленгации. Учитывая принцип действия таких пеленгаторов, фазовая когерентность имеет в данном

случае особое, практически определяющее угловую точность пеленга, значение. Как показано на рис. 5, в интерферометре используется сигнал гетеродина, который при испытаниях может заменяться одним из сигналов МКГ. Это необходимо для определения предельно достижимой угловой точности пеленгации вне привязки к качеству сигнала встроенного гетеродина.

Имитация радиолокационной обстановки для тестирования РЛС

Также, как и в случае ФАР, в которых передающие модули работают по единому задающему сигналу, РЛС регистрируют множество отраженных радиоволн от целей, но все они сформированы зондирующими радиоимпульсами. Классические испытания РЛС предполагают их использование в реальной обстановке – в месте эксплуатации, а также использование реальных перемещаемых объектов для имитации целей [4]. Такое решение является очень дорогим и экономически обосновано только на этапе государственных испытаний радиосистем оборонного назначения.

Более простой подход к имитации радиолокационной обстановки состоит в том (рис. 6), что при помощи МКГ могут быть симитированы не только образы сигналов, являющихся отражениями от целей, но и отражения от подстилающей поверхности, в том числе с учетом ее «засоренности» местными предметами [8]. При помощи такой имитации могут быть отработаны алгоритмы парирования радиоэлектронного противодействия РЛС, при котором станции постановки помех имитируют групповую цель путем излучения тиражированного принятого сигнала РЛС с разным фазовым сдвигом. Также, как и в ряде других применений, МКГ здесь могут использоваться для формирования опорных сигналов в передающей и приемной части РЛС. Суммирование сформированных сигналов может быть выполнено как в пространстве, так и в закрытых коаксиальных, полосковых или волноводных трактах. Для каждого канала МКГ могут быть настроены необходимым образом задержка и режим запуска, уровень сигнала, фазовый сдвиг и характеристики модуляции. Дополнительные возможности использования МКГ при тестировании РЛС связаны с имитацией постановки помех для оценки снижения выходных параметров радиосистем.

Радиолокационное картографирование земной поверхности

Суть метода картографирования земной поверхности с использованием радиолокации заключается в том,

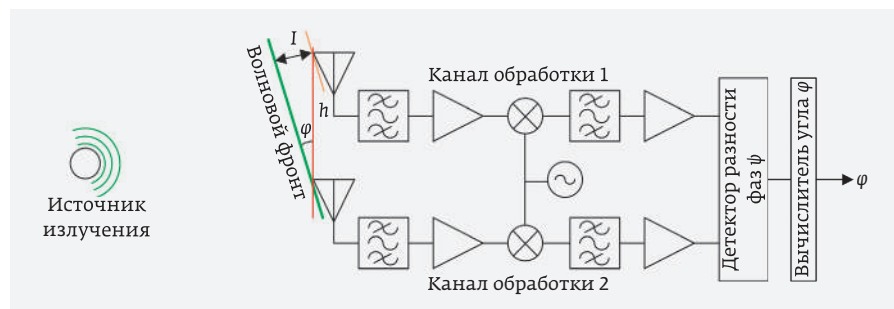


Рис. 5. Принцип действия фазового интерферометра

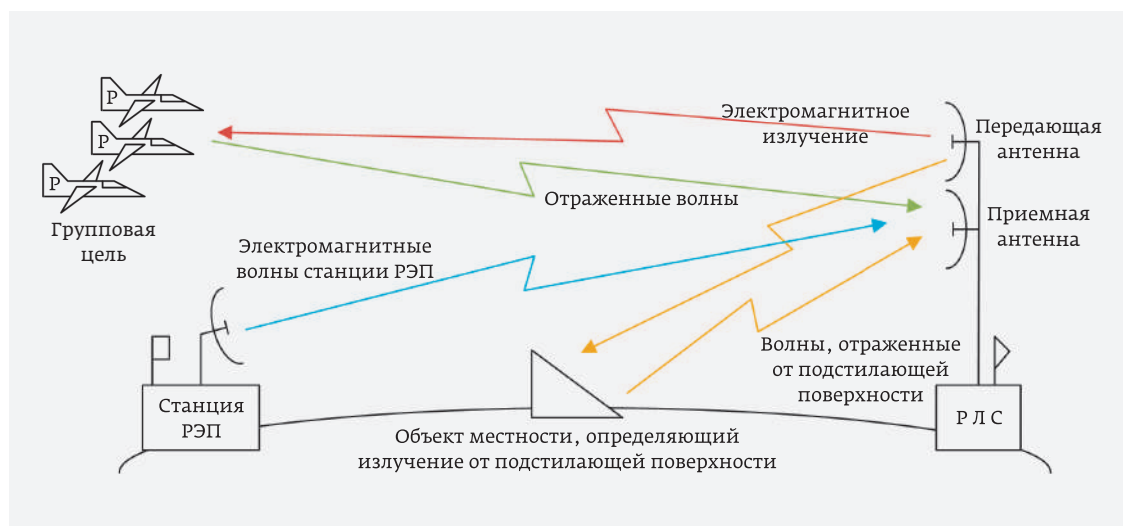


Рис. 6. Формирование радиолокационной обстановки при облучении групповой цели при наличии станции радиоэлектронного подавления (приемная и передающая антенны условно показаны разнесенными)

что РЛС со сравнительно небольшими антеннами размещаются на воздушных носителях и работают в режиме непрерывного излучения и приема электромагнитных волн. При этом приемная часть РЛС является многоканальной и регистрирует отражения от складок земной поверхности. За счет этого удается построить картографические снимки местности [1]. Если же РЛС переведена в режим бокового обзора, то тогда одновременно достигается и высокое разрешение, позволяющее выявить мелкие детали местности, например, металлические объекты, спрятанные под деревьями, в том числе автомобили, военную технику.

При тестировании средств радиолокационного картографирования МКГ применяются также, как и при тестировании РЛС классического назначения, однако ввиду сложности задачи целесообразно синтезировать формируемые сигналы в специальных программах типа MatLAB. При этом сигналы с выходов МКГ должны подаваться на входы приемников таких РЛС посредством закрытых трактов с выровненными задержками. В данном приложении МКГ критическими характеристиками генерации являются фазовые сдвиги сигналов и относительное время их запаздывания друг относительно друга.

Сервисное обслуживание и ремонт многоканальных приемников

Многоканальные приемники обычно имеют один или несколько переносов по частоте перед финальной обработкой сигналов. В них имеется несколько гетеродинов, отличающихся разной степенью стабилизации выходной частоты и, соответственно, разными фазовыми шумами. Учитывая достигнутые на сегодня для МКГ диапазоны рабочих частот, независимость и гибкость настройки из каналов, МКГ могут применяться в качестве источников стабилизированных синусоидальных колебаний,

заменяющих гетеродины на этапе отладки, настройки и ремонта приемников.

Технический контроль на производстве ВЧ/СВЧ-модулей и интегральных компонентов

Такой контроль обычно осуществляется с использованием групповых стандартных тестов, результаты которых трактуются в градации «годен/не годен». Учитывая, что выходные сигналы МКГ формируются независимо друг от друга и между ними может быть установлена фазовая когерентность, такие устройства способны заменять множество приборов в стендах функционального тестирования, если для его проведения требуются радиосигналы. Применение МКГ для испытаний интегральных компонентов возможно при наличии специальной измерительной оснастки [9].

Перспективные исследования и создание уникальных технических средств

Понятие когерентности широко используется не только в радиосвязи и радиолокации, но и в физических исследованиях, и, более того, оно заимствовано из области физики. Например, процесс генерации импульсного лазерного излучения с синхронным, одномоментным переходом молекул вещества из одного энергетического состояния в другое. Учитывая свойства фазовой когерентности выходных сигналов, МКГ могут применяться в составе научных установок с многоканальными диджитайзерами для обеспечения синхронности оцифровки. Сигналы с фазовой когерентностью также могут использоваться в установках формирования специальных воздействий на материалы, в метрологии, в качестве средства синхронизации пучков частиц, при разработке квантовых компьютеров и во многих других приложениях такого рода.

Таким образом, области практического применения МКГ оказываются весьма разнообразными и широкими.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К МНОГОКАНАЛЬНЫМ ГЕНЕРАТОРАМ

МКГ являются специализированным оборудованием радиолaborаторий, формирующим сигналы с фазовой когерентностью, которая должна быть выдержана с некоторой точностью, которая для МКГ в большинстве случаев и является определяющим критерием выбора. На качественном уровне фазовая когерентность характеризуется также заданным изменением фазы при перестройке по частоте [10]. В этом смысле принято различать:

- фазово-непрерывную перестройку по частоте (рис. 7а), отличающуюся тем, что после изменения его частоты фаза сигнала сохраняет свое значение, а сигнал остается непрерывным, не имеющим скачков;
- фазово-когерентную перестройку по частоте (рис. 7б), характеризующуюся сохранением значения фазы при возврате к прежней частоте и наличием скачков фазы при перестройке по частоте;
- перестройку с памятью фазы (рис. 7в), отличающуюся возвратом к тому же значению фазы, которое было бы у сигнала, если бы его частота сохранялась неизменной.

Если же сохранение разности фаз при перестройке по частоте не прогнозируемо, то тогда МКГ не будет относиться к классам фазокогерентных и фазостабильных. Важно обратить внимание, что рассмотренная терминология является неоднородной, в первом и третьем случае она относится к одному выходному сигналу МКГ, а во втором – к двум таким сигналам.

Требования к МКГ в части сохранения фазы состоят в том, чтобы они обеспечивали заданный тип изменения фазы при перестройке по частоте. В охарактеризованных выше приложениях это позволяет имитировать сигналы с требуемыми фазовыми соотношениями. Тип приемлемой фазовой когерентности зависит от того, для какой задачи применяются МКГ. Так, например, сигналы систем цифровой связи с частотной манипуляцией с минимальной полосой должны имитироваться с фазовой непрерывностью, поскольку скачки по фазе всегда расширяют полосу занимаемых частот [11]. С другой стороны, радиосистемы скрытой связи с псевдослучайной перестройкой по частоте, имеющие многоканальные приемники, чаще всего характеризуются сохранением фазы в силу особенностей архитектуры передающих устройств [12].

По сути, МКГ отличаются от одноканальных приборов только количеством выходных сигналов и специальными, рассмотренными ниже решениями, которые реализуются в обеспечение фазовой когерентности. Для эффективного использования МКГ необходимо, чтобы сигнал с каждого выхода отвечал заданным требованиям по качеству. Ключевую роль будут играть уровень фазового

шума, нелинейные искажения, скорость перестройки частоты, предельный уровень мощности, доступные виды и характеристики модуляции.

Чем выше уровень фазового шума, тем ниже коэффициент когерентности между каналами. Уровень фазового шума ограничивает предельно возможное количество каналов МКГ, в совокупности соответствующих заданным показателям когерентности. Очевидно, что уровень фазового шума влияет и на качество модуляции в каждом из каналов. Для современных генераторов достижимы очень низкие его уровни – до -130 дБн и до -150 дБн в полосе 1 Гц при отстройке 1 и 100 кГц соответственно на частотах порядка 1 ГГц. С ростом несущей частоты уровень фазового шума растет, это является одной из проблем освоения диапазона крайне высоких частот (выше 30 ГГц).

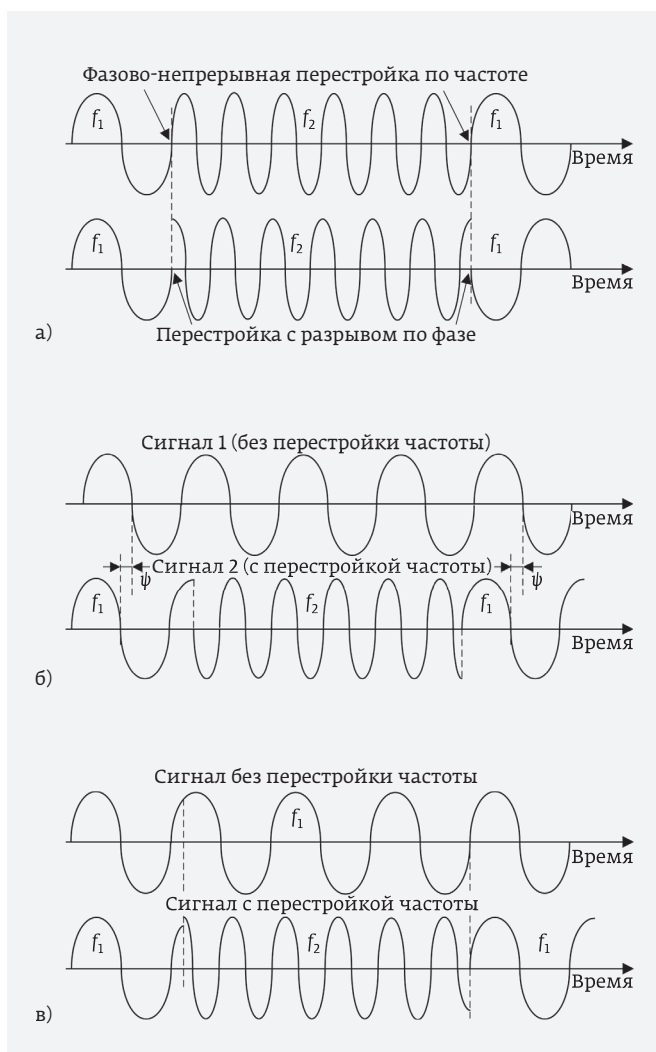


Рис. 7. Перестройка по частоте: а – фазово-непрерывная; б – фазово-когерентная; в – с памятью фазы

Особенностью нелинейных искажений сигналов МКГ является сохранение в целом того же уровня когерентности, который свойственен основным сигналам. Ограничение уровня нелинейных искажений здесь необходимо в первую очередь по той причине, что порожденные ими спектральные составляющие могут непредсказуемым образом воздействовать на объекты тестирования, вызывая интермодуляционные явления, продукты которых будут неизменно попадать в полосу пропускания. Типовые уровни нелинейных искажений для современных МКГ составляют порядка -90 дБн и -80 дБн на частотах 1 и 10 ГГц соответственно.

Требования по максимальной скорости перестройки по частоте предъявляются к МКГ в случае, если они используются для имитации сигналов с псевдослучайной перестройкой по частоте, при тестировании ФАР и средств радиоэлектронного подавления, при работе в составе научных установок. Этот показатель обычно задается в категориях времени, гарантированно достаточного для переключения между некоторыми частотами. Современные МКГ могут осуществлять переключение между частотами за время 20...50 мкс без потери когерентности.

Практически все приложения, типичные для МКГ, требуют весьма высокого уровня выходной мощности. Для подключения к передающим модулям ФАР потребуется -30 ... 10 дБм, если же связь с потребителями реализуется через свободное пространство, то это значение составит не менее 0 дБм. Предельная выходная мощность существенно снижается с ростом частоты, также следует учитывать потери в трактах. МКГ должны обеспечивать выходную мощность на канал не менее 25...30 дБм и 20 дБм на частотах 1 и 18 ГГц. Во всех случаях в качестве критерия максимальной мощности следует рассматривать достижение предельно допустимых искажений сигналов.

Требования по видам и характеристикам поддерживаемой МКГ модуляции определяются сферой их применения. Обычно такие генераторы поддерживают амплитудную, частотную, фазовую и импульсную модуляцию, позволяющие имитировать сигналы систем радиолокации и радиосвязи. Некоторые генераторы допускают одновременное применение к несущей двух видов модуляции, например, амплитудной и фазовой. Теоретически это позволяет сформировать сигналы с MSK-, FSK-, BPSK-, QPSK-модуляцией, а также более высокими ее типами. При необходимости МКГ могут сочетаться с технологией векторного построения сигналов, а также с синтезом сигналов в MathLAB [13].

Таким образом, при выборе МКГ следует ориентироваться на особенности поставленных измерительных задач и специфику объекта исследований, из которых будут следовать требования к перечисленным качественным и количественным параметрам. Следует помнить, что объединение нескольких МКГ в единую систему всегда

приводит к снижению показателей фазовой когерентности, что определяется особенностями межблочной синхронизации. В отсутствие иной информации можно полагать, что между МКГ она будет в 2...5 раз ниже, чем между каналами одного МКГ.

Поскольку построение МКГ существенно отличается от элементарного объединения в одном корпусе двух независимых генераторов, целесообразно рассмотреть основные системотехнические проблемы их построения и способы обеспечения фазовой когерентности.

СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФАЗОВОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ СИГНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

Как отмечалось выше, простая настройка генераторов на одинаковую частоту и вид модуляции не способны обеспечить фазовую когерентность их выходных сигналов. Вместе с тем, для рассмотренных приложений понятие фазовой когерентности оказывается существенно шире, чем требование о сохранении заданной разности фаз между каналами. К настоящему времени выработаны пять способов обеспечения фазовой когерентности сигналов, отличающихся разной сложностью и достижимым результатом синтеза [11].

1. Синхронизация источников сигналов единым опорным генератором отличается простотой реализации и предполагает подключение одного генератора к источнику опорной частоты такого же генератора. В этом случае фазовый шум синтезаторов остается некоррелированным, что ухудшает согласование каналов по фазе, однако позволяет достичь единства их шкал частоты и времени. Ошибки по фазе в данном случае будут обусловлены разницей в характеристиках синтезаторов частоты, а также высокой зависимостью от фазовой стабильности используемого опорного генератора, в особенности для схем синтезаторов с умножением по частоте. Такое решение не позволяет синхронизировать произвольное количество отдельных генераторов без использования активных разветвителей, которые сами по себе являются весьма дорогостоящими устройствами. Достижимое для такого решения согласование по фазе составляет 10...30 градусов, что неприемлемо велико для большинства применений МКГ.
2. Использование общего гетеродина позволяет улучшить согласование по фазе до 1...3 градусов, при этом достигается корреляция фазовых шумов синтезаторов частот для разных каналов. Из недостатков такого решения следует отметить сложность настройки и масштабирования МКГ, необходимость использования фазостабильной системы распределения сигнала гетеродина. Кроме того, в данном

случае невозможно выполнить фазокогерентную перестройку частоты, так как фаза настраивается только для задающего гетеродина или в пределах рабочей полосы векторного генератора.

3. Использование единых опорной частоты, сигнала гетеродина и векторной генерации с фазовой коррекцией позволяет достичь фазовой когерентности на уровне 0,1...1 градус. При этом перестройка по фазе реализуется как в цифровой части синхронизируемых векторных генераторов, так и в аналоговой. Для гетеродинных сигналов применяются цепи сдвига по фазе, например, управляемые линии задержки. Преимущество такого решения состоит в возможности формирования фазокогерентных сигналов в пределах полосы синтеза векторных генераторов, которая может достигать единиц ГГц. Из недостатков решения следует отметить его высокую стоимость, сложность настройки МКГ в целом, существенную зависимость фазовых сдвигов от температуры, ограничения по разному частот сигналов в каналах МКГ.
4. Использование многоканального цифрового синтеза предполагает формирование выходных сигналов с применением цифроаналоговых преобразователей сверхвысокого быстродействия и позволяет достичь погрешности по фазе на уровне 1...2 градуса, а также высокой универсальности по типам формируемых сигналов. Каналы МКГ охватываются единой системой опорных сигналов и частот, сдвиг по фазе обеспечивается смещением моментов тактирования в каждом из каналов. При относительной простоте такое решение оказывается не всегда применимо в тех приложениях, где требуется формировать сигналы с импульсной модуляцией с большим динамическим диапазоном (имитация сигналов РЛС, радиоэлектронного противодействия). Кроме того, качество сигналов будет в значительной степени зависеть от эффективности фильтрации внеполосных составляющих.
5. Комбинированный метод генерации фазокогерентных сигналов предполагает сочетание принципов цифрового синтеза с использованием ЦАП высокой разрядности для формирования модулирующего сигнала, а также охват всех каналов МКГ единой системой опорных частот и сигналов. Управление фазой в таком случае реализуется на уровне гетеродинов и синтезаторов, во многом снимаются ограничения по ширине рабочей полосы, свойственные векторным генераторам. Такое решение обеспечивает стабильность фазовых соотношений на уровне 0,2...0,4 градуса, а также возможность установки любых типов когерентности, рассмотренных в предыдущем разделе. Возможности масштабирования системы ограничены только необходимостью

межблочной синхронизации МКГ, сигналы с импульсной модуляцией могут иметь динамический диапазон до 90...100 дБ.

Описанные системотехнические решения во многом определяют ключевые практические сложности формирования и использования фазокогерентных сигналов. Здесь следует выделить три базовые проблемы.

1. Схемотехника МКГ гарантирует фазовую когерентность сигналов на его выходах. Однако схемы измерений могут включать не только фазостабилизирующие кабели, но также активные и пассивные узлы с разной задержкой и разной фазовой стабильностью. Ввиду этого измерительные тракты должны быть подвергнуты предварительной калибровке с использованием векторных анализаторов цепей. По результатам таких предваряющих измерений, возможно, потребуется скорректировать настройки МКГ для основных измерений.
2. Одним из применений МКГ является замена гетеродинов при отладке радиосистем. Для того, чтобы при этом качество обработки сигналов не стало зависеть от такой замены, необходимо, чтобы в составе МКГ использовались гетеродины с ультранизким уровнем фазовых шумов. Создание таких узлов – отдельная задача радиоэлектроники, ее решение осложняется необходимостью многократного переноса сигналов по частоте для МКГ с рабочими частотами до 20 ГГц и более.
3. Не менее сложной задачей является подавление нелинейных эффектов, возникающих в трактах МКГ. Известно, что большой запас по линейности существенно повышает стоимость средств измерений и, в частности, высокочастотных активных трактов [14]. В то же время специфика применения МКГ требует жесткого контроля проявлений нелинейных эффектов, поскольку они приводят к интермодуляционным явлениям между спектральными составляющими сформированных сигналов, результатом чего является нарушение условий когерентности.

Во второй части статьи рассмотрим характеристики и функциональные особенности генераторов Nosean серии MSG5000, а также примеры настройки МКГ для решения практических задач, представим результаты экспериментальной оценки фазовых свойств сигналов, формируемых МКГ Nosean серии MSG5000.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Маляренко А.С. и др.** Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. / Под ред. Ширмана Я.Д. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.

2. **Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. 544 с.
3. **Грудинская Г.П.** Распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1975. 280 с.
4. **Филиппов В.С., Пономарев Л.И., Гринёв А.Ю. и др.** Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Воскресенского Д.И. М.: Радио и связь, 1994. 592 с.
5. **Оппенгейм А., Шафер Р.** Цифровая обработка сигналов / Под ред. Боева С.Ф. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2012. 1048 с.
6. Справочник инженеров по радиомониторингу / Под ред. Слободнюка П.В. Киев, 2012. 720 с.
7. **Бузов А.Л., Быховский М.А., Васехо Н.В.** Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем / Под ред. Быховского М.А. М.: Экотрендз, 2006. 376 с.
8. ГОСТ Н 51317.2.5-2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. М.: Издательство стандартов, 2001. 40 с.
9. **Эннс В.И., Кобзев Ю.М.** Проектирование аналоговых КМОП-микросхем. Краткий справочник разработчика / Под ред. Эннса В.И. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 454 с.
10. Апарисо. Многоканальные генераторы. Брошюра. Н. Новгород: ООО «Америт», 2020. 23 с.
11. Спутниковая связь и вещание. Справочник. 3-е изд. / Под ред. Кантора Л.Я. М.: Радио и связь, 1997. 528 с.
12. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: ИД «Вильямс», 2003. 1104 с.
13. **Гультяев А.К.** MatLAB 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows. СПб: Корона принт, 2001. 400 с.
14. **Корякин В.С., Кравчук Ю.В., Лебедев О.В. и др.** Измерители радиопомех / Под ред. Фастовского И.А. М.: Связь, 1973. 152 с.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ.

ИЗДАНИЕ 3-Е, ИСПРАВЛЕННОЕ
Оппенгейм А., Шафер Р.

М: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 1048 с.
ISBN 978-5-94836-329-5

Цена 1300 руб.

Предлагаемая вниманию читателя книга — третье переработанное издание всемирно известного классического учебника «Цифровая обработка сигналов», опубликованного в 1975 году. В ее основу лег развернутый курс по цифровой обработке сигналов, преподававшийся в течение ряда лет в Массачусетском технологическом институте. Учебник посвящен математическим алгоритмам, реализуемым в цифровых системах.

В нем опущены сложные доказательства математических утверждений, но все приемы и методы иллюстрированы многочисленными примерами и задачами.

Книга будет полезна как студентам, осваивающим предмет, так и инженерам-разработчикам и системотехникам.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru