

Современные решения для измерения параметров многоапертурных и фазированных антенных решеток

Формирование диаграммы направленности с одним или несколькими лучами с помощью электронного сканирования антенной решетки находит применение во многих приложениях. К ним относятся РЛС, системы связи, радиотелескопы и многое другое. Антенная решетка состоит из нескольких антенн или излучающих элементов, которые передают сигналы, относительную фазу которых выбирают так, чтобы получить луч определенной формы и направления. Комбинируя конструктивные особенности антенной решетки с методами формирования диаграммы направленности, можно повысить пространственную селективность и снизить уровень помех. Неудивительно, что антенные решетки уверенно вытесняют механически управляемые антенны.

Алекс ДИКСОН (Alex DICKSON)
Джон С. ХАНСЕН (John S. HANSEN)

Сначала появились антенные решетки с пассивным электронным сканированием (PESA), в которых сигнал генерировался на одной частоте небольшим числом передатчиков, причем в каждом излучающем элементе антенны регулировался сдвиг фазы. Это позволяло быстро изменять направленность луча антенны и реализовать несколько функций в одной антенне. Преимущество антенных решеток с активным сканированием (AESA) заключается в том, что отдельный передающий модуль устанавливается непосредственно на каждый элемент антенны или достаточно близко от него, в отличие от общего передатчика, используемого в системах PESA. Каждый приемо-передающий модуль (TRM) может генерировать собственный независимый сигнал с нужной фазой и частотой. Это позволяет создавать вторичные лепестки диаграммы направленности и использовать одну антенну как несколько антенн, каждая из которых работает на своей частоте. Подвижность луча, обеспечиваемая гибкостью такой архитектуры, позволяет выполнять скачкообразную

перестройку частоты и применять непредсказуемые траектории сканирования луча, эффективно избегая преднамеренных помех.

Со временем полупроводниковые усилители достигли в своем развитии такого уровня, когда передающие модули можно было сделать компактными и одновременно достаточно мощными для РЛС большой дальности действия. Это стало возможным за счет применения полупроводниковых приборов на основе нитрида галлия (GaN), обладающих высокой мощностью и термостабильностью. При размещении аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей сигналов непосредственно в приемо-передающих модулях (рис. 1) значительно упрощается общая конструкция системы, так как при этом антенна получает цифровой интерфейс вместо сложной аналоговой фидерной системы.

Тестирование и калибровка фазированных антенных решеток порождают множество проблем. Чем больше элементов содержит антенна, тем больше времени уходит на полное измерение ее характеристик. В фазированных антенных решетках, состоящих из сотен или тысяч элементов, нужно измерить характеристики каждого элемента относительно других элементов. Применение нескольких когерентных измерительных каналов позволяет значительно ускорить такие измерения.

Относительная погрешность фазы и амплитуды (усиления) между отдельными элементами антенной решетки существенно ухудшает ее общие характеристики. Поскольку фаза используется для управления диаграммой направленности фазированной антенной решетки, погрешность, создаваемая неправильным положением излучающих элементов, должна быть компенсирована так, чтобы обеспечить эффективную и точную работу антенны. Далее мы обсудим статическую погрешность фазы и усиления в нескольких элементах и опишем новые методы получения набора калибровочных данных для коррекции этих ошибок.

В зависимости от сигнала можно применять два метода анализа межканальной характеристики путем измерения относительной фазы и амплитуды.

Первый метод основан на использовании узкополосного свипирующего или ступенчато изменяющегося сигнала и узкополосного

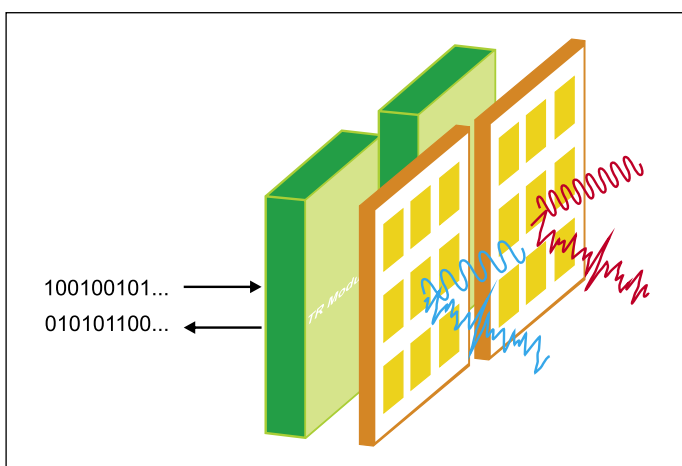


Рис. 1. Антенные решетки с активным сканированием могут соединяться с системой только цифровым интерфейсом

приемника для поочередного измерения частот и выполнения межканальных расчетов во временной области. Однако этот метод ограничен возможностями узкополосных измерений.

При втором методе используются широкополосные испытательные сигналы и широкополосный приемник для измерения одновременно на всех частотах и вычисления межканального спектра. Идеальное измерительное решение должно гибко сочетать оба этих метода. Эту гибкость обеспечивает широкополосный дигитайзер с цифровым понижающим преобразователем частоты, что позволяет создать уникальное решение благодаря настраиваемой полосе сигнала. Давайте подробнее рассмотрим цифровой понижающий преобразователь частоты и его преимущества для этой задачи.

Как показано на рис. 2, аппаратно реализованный цифровой понижающий преобразователь частоты представляет собой двухкаскадный блок обработки цифрового сигнала, на который поступают данные непосредственно с аналого-цифрового преобразователя (АЦП) со скоростью, соответствующей частоте дискретизации. Затем, после преобразования частоты и прореживания, данные сохраняются в памяти дигитайзера в виде комплексных чисел I и Q. Кроме того, цифровой преобразователь частоты можно создать программным способом, но программный преобразователь работает значительно медленнее и требует, чтобы данные АЦП, полученные на полной частоте дискретизации, сначала выгружались из дигитайзера для обработки.

Что же именно дает вам цифровой понижающий преобразователь частоты? Являясь частью дигитайзера, он позволяет выделить интересующий вас сигнал, затем улучшить отношение сигнал/шум и расширить динамический диапазон в пределах полосы сигнала за счет уменьшения интегрированного шума. Кроме того, он освобождает память захвата, уменьшая объем данных, которые нужно передать для этой длительности захвата. Поскольку объем данных, которые нужно анализировать, уменьшается, цифровой преобразователь частоты может снизить нагрузку на алгоритмы последующей обработки.

Также цифровой преобразователь частоты повышает чувствительность фазовых и амплитудных измерений, уменьшая шум во временной области. Плотность шума остается той же, но его влияние на измерения уменьшится за счет сокращения полосы обзора. На рис. 3 приведены осциллограммы нескольких сигналов и показано, как при заданном пороге можно визуализировать разность фаз между этими сигналами. Здесь некоторую трудность может представлять определение реального момента времени, соответствующего пересечению порога зашумленным сигналом. Судя по трем приведенным осциллограммам, с уменьшением шума

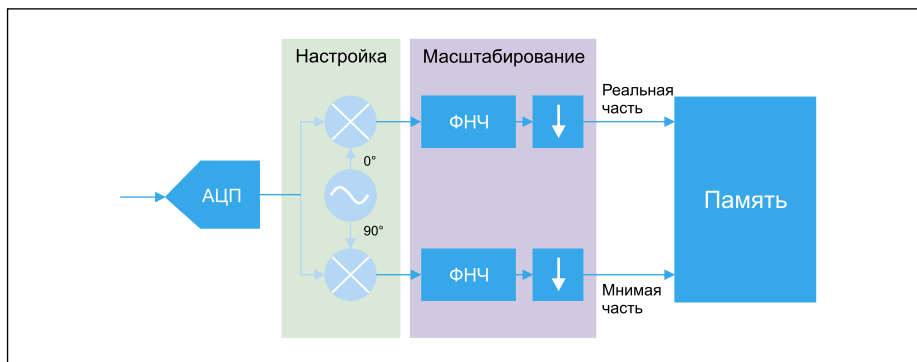


Рис. 2. Структурная схема аппаратного цифрового понижающего преобразователя частоты

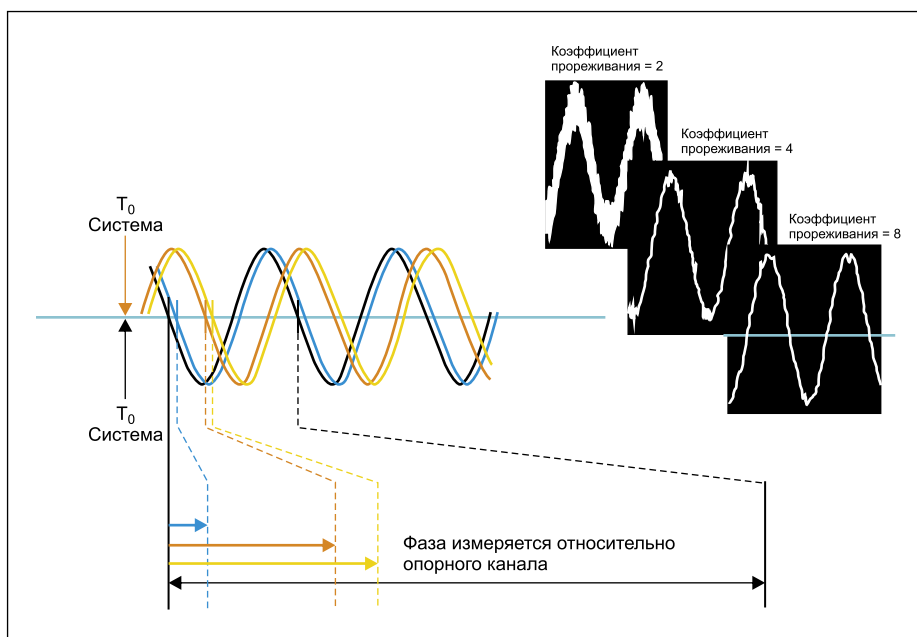


Рис. 3. Измерение относительной фазы в присутствии шумов

сигнала точность определения момента пересечения порога возрастает.

На рис. 4 показана общая структурная схема измерительной системы, используемой для тестирования и калибровки антенных решеток. Как уже говорилось, задача заключается в измерении относительной фазы и амплитуды излучающих элементов фазированной антенной решетки. Когда приходится иметь дело с большими антенными решетками, состоящими из сотен и тысяч элементов, желательно тестировать несколько пар элементов одновременно, чтобы повысить скорость измерения.

Сигнал снимается с элементов тестируемой антенной решетки и проходит слева направо через несколько каскадов обработки и понижения частоты. Целью является получение радиочастотного сигнала антенных элементов с уровнем несколько мкВт и понижение его частоты до ПЧ, лежащей в пределах полосы пропускания дигитайзера. Для оптимального использования динамического диапазона дигитайзера сигнал обычно приходится усиливать или ослаблять до соответствующего уровня. В некоторых случа-

ях применяется фильтр нижних частот для подавления зеркальных составляющих.

Конечным элементом измерительной схемы является дигитайзер. При тестировании фазированной антенной решетки для повышения скорости измерений желательно тестировать несколько пар элементов параллельно. Следовательно, нужно использовать многоканальный дигитайзер с когерентными по фазе входами (с разностью фаз менее одного градуса). Для фазированной антенной решетки, состоящей из сотен и тысяч элементов, где приходится измерять параметры каждого элемента относительно других, возможность ускорения тестирования за счет применения нескольких входных каналов дает существенное преимущество. С развитием технологий и повышением сложности антенных систем не менее важным фактором становится масштабируемость платформы с возможностью наращивания числа каналов по мере необходимости.

Кроме того, необходим дигитайзер с достаточно широкой аналоговой полосой пропускания по уровню 3 дБ, который по-

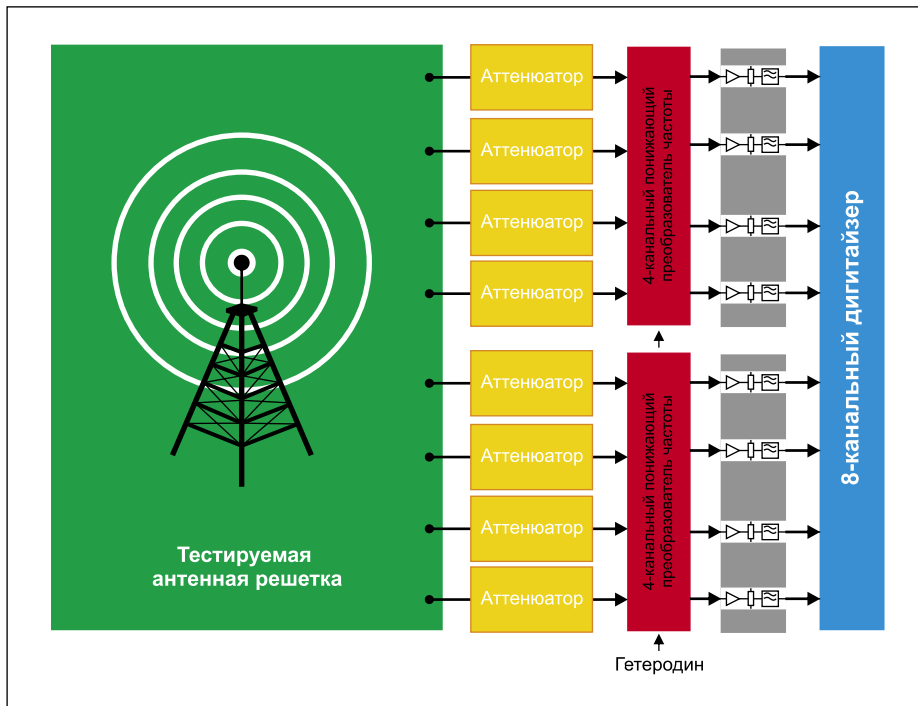


Рис. 4. Структурная схема испытательной системы для измерения характеристик многоэлементной антенной решетки

зволяет обрабатывать сигналы для всех видов измерений фазированной антенной решетки. Современные антенные решетки с электронным управлением (AESA) пере-

дают и принимают не только узкополосные аналоговые сигналы, но зачастую работают с широкополосными сигналами, такими как коммуникационные сигналы с разными

видами цифровой модуляции. Например, существует несколько типов РЛС, которые используют импульсные ВЧ-сигналы или коды Баркера, а также иные виды модулированных сигналов, занимающих широкую полосу. Следовательно, необходим дигитайзер, обладающий достаточной полосой для выполнения широкополосных измерений.

Высокоскоростной дигитайзер Agilent M9703A формата AXIe с опциональным цифровым понижающим преобразователем частоты имеет восемь синхронизированных каналов регистрации. Это 12-разрядное решение для оцифровки может регистрировать сигналы от постоянного тока до 2 ГГц с частотой дискретизации 1,6 Гвыб/с (или 3,2 Гвыб/с с чередованием) во внутреннюю память объемом 4 Гбайт.

Применение широкополосного многоканального когерентного дигитайзера для измерения относительной фазы и амплитуды сигнала каждого элемента антенной решетки в корне отличается от методов, используемых в прошлом. Хорошо знакомые узкополосные измерения традиционно применялись для тестирования антенн с помощью одного или нескольких анализаторов цепей. Но широкополосные сигналы, имитирующие сигналы современных средств связи, дают более реалистичный ответ о наличии нелинейностей. Преимущества этой методики заслуживают дальнейшего изучения. ■