

Анализ частотно-модулированных сигналов автомобильных радаров (FMCW)

с помощью учебного курса «Изучение ВЧ/СВЧ сигналов» U3851A

Введение

Автомобильные аварии всегда были серьезной проблемой. В течение последнего года во всем мире в ДТП погибло более миллиона человек и было получено огромное количество травм. Одной из существенных причин этих трагедий является ограниченный обзор при движении в автомобиле. В связи с этим ученые и инженеры разрабатывают радиолокационные технологии для помощи водителям на дорогах. В настоящее время в большинстве транспортных средств широко используются радиолокационные системы, такие как система помощи при смене полосы движения (LCA), система обнаружения слепых зон (BSD), адаптивный круиз-контроль (ACC) и система предупреждения о столкновении сзади (RCW).

Наиболее часто в автомобильных радарх применяется непрерывный частотно-модулированный сигнал (FMCW). Этот сигнал также часто используется в радиолокационных вышотомерах, навигационных системах и дальномерных датчиках. Он обеспечивает более точное измерение расстояния по сравнению с импульсным, даже если объекты расположены близко друг от друга. Радиолокационная система FMCW обеспечивает обнаружение и одновременное измерение расстояния до окружающих объектов и их скорости движения. Хотя выполняемые в масштабе реального времени расчеты обрабатываемого сигнала сложны, быстродействия современных процессоров достаточно для обработки сигналов FMCW. Кроме того, невысокая стоимость этих процессоров позволяет широко использовать их в автомобильной промышленности. В совокупности с другими факторами, применение данных радиолокационных систем делает разработку беспилотных автомобилей экономически целесообразной.

Хотя технология FMCW предлагает множество преимуществ для автомобильной промышленности, тестировать данный сигнал в реальности довольно сложно, а организовать обучение студентов работе с ним очень дорого. Поэтому мы будем анализировать сигнал FMCW с использованием учебного курса Keysight U3851A «Изучение ВЧ/СВЧ сигналов». В этом документе мы обсудим проектирование и моделирование радаров FMCW с помощью ПО PathWave System Design 2020, создание приемника с помощью комплекта прототипа, входящего в состав U3851A, и выполнение измерений и анализа реальных и смоделированных сигналов с помощью ПО VSA.



Учебный курс
«Изучение ВЧ/СВЧ
сигналов» U3851A

-Готовая обучающая
система

-Включает в себя
программное
моделирование
и проверку
оборудования

-Возможность
расширения для
быстрого обучения
проектированию

Автомобильный радар с частотно-модулированным сигналом непрерывного излучения

Радар FMCW работает аналогично радару непрерывного излучения (CW), который непрерывно ведет излучение на известной фиксированной частоте и принимает сигнал, отраженный окружающими объектами. Однако радар непрерывного излучения только обнаруживает объект и не предоставляет никакой информации о расстоянии до него из-за отсутствия отметки времени, необходимой для определения местоположения. В отличие от радара непрерывного излучения, система FMCW передает частотно-модулированный сигнал, рабочая частота которого изменяется во время измерения. Сигналы такого типа позволяют определять расстояние до объекта. На рис. 1 показано, как система обеспечивает круговой обзор для автомобиля.



Рис. 1. Сенсорная система обнаружения с сигналом FMCW.

Для измерения расстояния радар FMCW измеряет разность частот переданного и принятого сигналов. Построенный на недорогих компонентах радар FMCW обеспечивает превосходное разрешение по дальности (до 3,5 см) и может обнаруживать объекты, расположенные близко друг от друга. Данный радар способен принимать и передавать сигналы одновременно и поэтому может обнаруживать сразу несколько объектов. Недостатком радара FMCW является обнаружение несуществующих (ложных) целей. Это легко устраняется измерением наклона частотной характеристики модулирующего сигнала. Система FMCW также подвержена влиянию эффекта Доплера, когда частота принятого сигнала смещается вверх или вниз, что приводит к ошибке в измерении расстояния. Данная проблема устраняется использованием различных схем модуляции, такими как модуляция с повышением или понижением частоты.

Диапазон и полоса частот

Наиболее часто в автомобильной промышленности используются диапазоны 24 ГГц и 77 ГГц. Диапазон 24 ГГц предназначен для узкополосных (NB) и сверхширокополосных (UWB) систем. Узкополосные системы имеют ширину полосы 200 МГц и работают на частотах от 24,05 ГГц до 24,25 ГГц, лежащих в диапазоне ISM. Сверхширокая полоса обладает шириной до 5 ГГц (от 21,65 до 26,65 ГГц). Однако в соответствии с правилами и стандартами, разработанными Европейским институтом телекоммуникационных стандартов (ETSI) и Федеральной комиссией связи (FCC), к 2022 году применение UWB будет постепенно сворачиваться в Европе и Соединенных Штатах, и для более долгосрочного применения будет разрешен только узкополосный диапазон ISM. Поскольку полоса такого сигнала сильно ограничена, то в сочетании с возрастанием требований к производительности радиолокационных систем, разработка автомобильных радаров диапазона 24 ГГц становится в настоящее время не столь актуальной. Взамен диапазона 24 ГГц, регулирующие органы открыли для автомобильных радаров диапазон 77 ГГц. Его ширина составляет 4 ГГц – от 77 ГГц до 81 ГГц. Таким образом, располагая более широкой полосой, радар на частоте 77 ГГц может обеспечить дополнительные преимущества, такие как увеличение разрешения по дальности и скорости, а, следовательно, позволяет автомобилям различать несколько объектов, находящихся на близком расстоянии, таких как посторонние предметы на дороге и мотоциклы.

Анализ сигналов FMCW

Анализ сигнала FMCW на столь высоких частотах, таких как 77 ГГц, является очень дорогостоящим из-за сложности конструкции оборудования. В силу этого аппаратные измерения и анализ будут проводиться с помощью комплекта прототипа из учебного курса «Изучение ВЧ/СВЧ сигналов» U3851A. И хотя частота несущей и ширина полосы пропорционально уменьшены, но состав системы и возможности аппаратных измерений вполне достаточны для демонстрации концепции FMCW. Ниже перечислены параметры, используемые для анализа.

Частота несущей: 1,8425 ГГц
Форма модулирующего сигнала: треугольная
Частота модулирующего сигнала: 200 кГц
Полоса модулированного сигнала: 10 МГц
Частота дискретизации: 100 МГц
Мощность сигнала: -10 дБм

Проектирование и моделирование

Проектирование и моделирование системы FMCW осуществляются с помощью ПО PathWave System Design 2020. Проектирование стало возможным благодаря библиотеке PathWave System Design, которая обеспечивает моделирование и тестирование автомобильной радиолокационной системы. Ниже показана блок-схема генерирования сигнала FMCW.

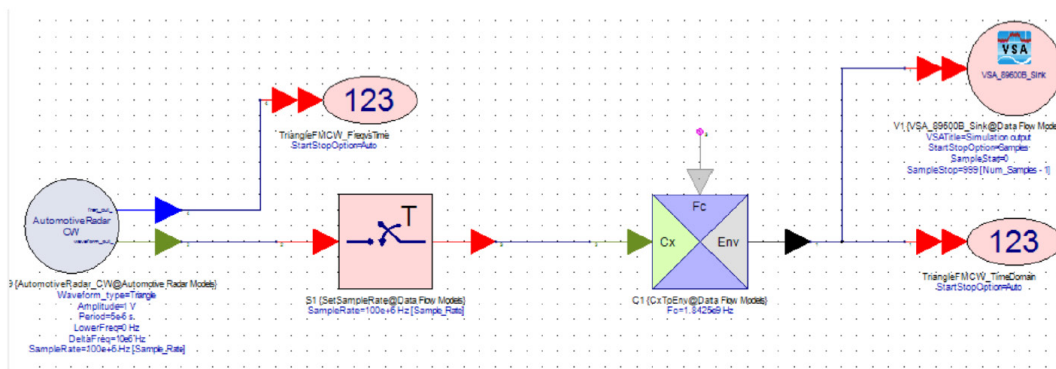


Рис. 2. Блок-схема генерирования сигнала FMCW.

Сигнал FMCW формируется после соединения всех блоков и ввода всех указанных выше параметров сигнала. Быстрым способом проверки является использование выходных блоков индикации. Ниже приведены результаты.

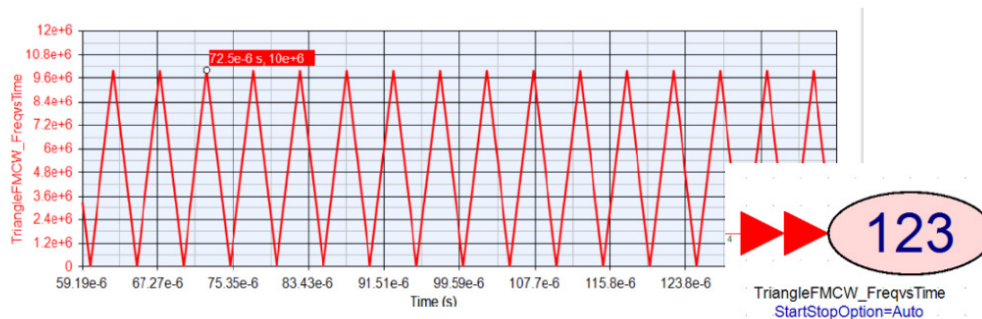


Рис. 3. Треугольный сигнал с полосой 10 МГц.

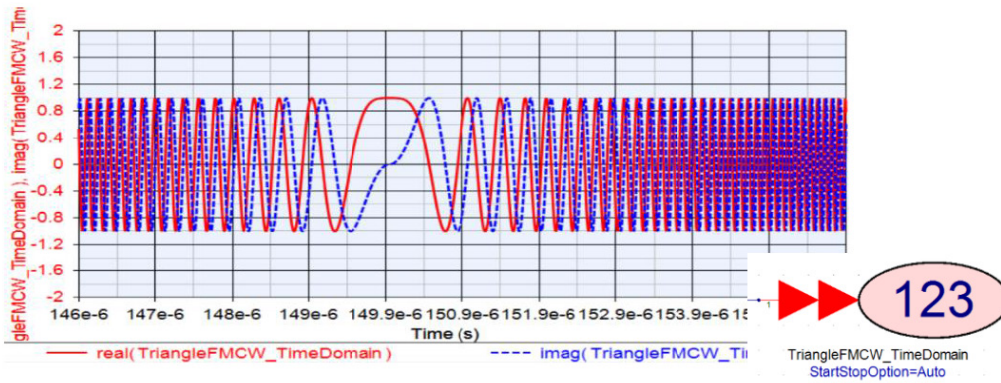


Рис. 4. Модулированный сигнал FMCW.

Анализ смоделированного сигнала FMCW

Для дальнейшего анализа файл с полученным сигналом FMCW из VSA подается в ПО Keysight VSA. Оно содержит библиотеку анализа FMCW Radar Analysis, с помощью которой можно демодулировать модулированный сигнал FMCW. Для упрощения анализа он делится на кадры. Некоторые важные параметры будут рассмотрены ниже.

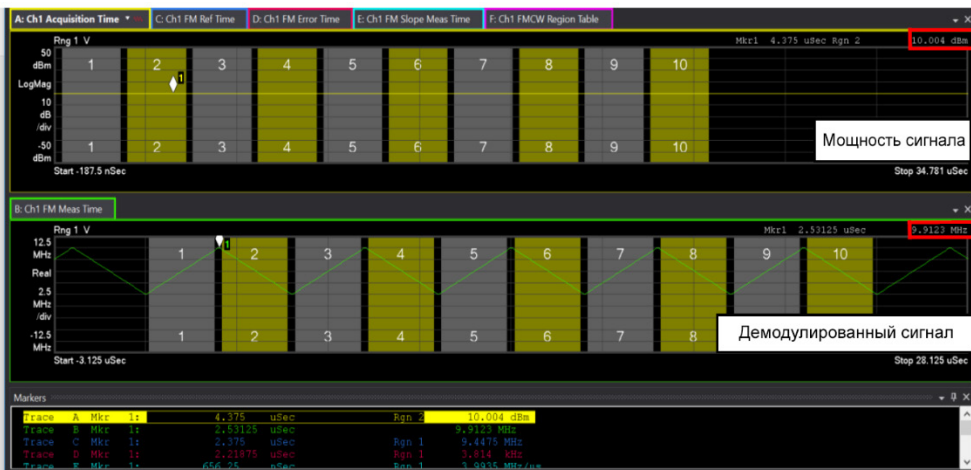


Рис. 5. Демодулированный сигнал FMCW и линейное изменение мощности.



Рис. 6. Демодулированный (внизу) и опорный (вверху) сигналы.

На рис. 5 показано, что выходная мощность имеет линейную зависимость от времени, что нормально для системы. На рис. 6 демодулированный сигнал сравнивается с опорным из VSA. Демодулированный сигнал имеет треугольную форму (как было задано ранее). Это указывает на то, что демодуляция выполнена успешно.

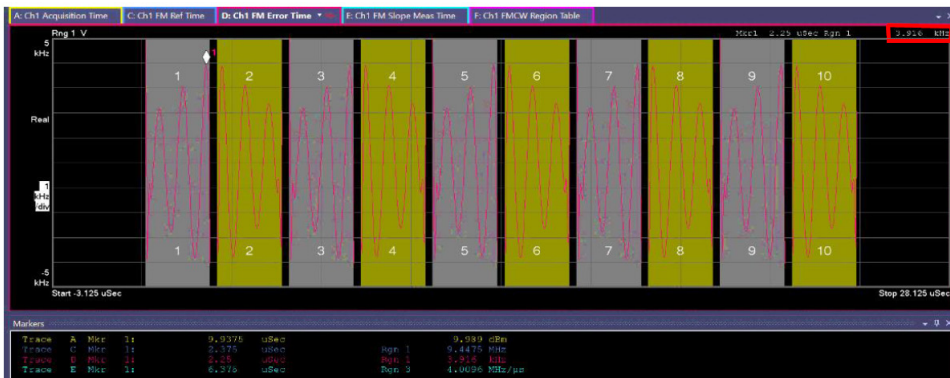


Рис. 7. Ошибка по частоте демодулированного сигнала FMCW.

Хотя оба сигнала имеют схожую форму, у них имеются некоторые различия по частоте в определенное время и эти отклонения показаны на рис. 7. Абсолютную погрешность можно вычислить по следующей формуле.

Погрешность по частоте ЧМ в заданное время (Гц) = Частота опорного сигнала ЧМ в заданное время – Частота демодулированного сигнала в заданное время

Если эта погрешность достаточно велика, то она может значительно повлиять на разрешение дальности и ухудшить точность измерения расстояния на коротких дистанциях. Максимальная абсолютная погрешность по частоте в данном процессе демодуляции может достигать 8 кГц (пик-пик). В процентном выражении погрешность вычисляют по формуле:

$$\text{Error (\%)} = \frac{\text{Peak to peak error (Hz)}}{\text{Bandwidth of the modulated signal (Hz)}} \times 100\%$$

$$= \frac{8 \text{ kHz}}{10 \text{ MHz}} = 0.08\%$$

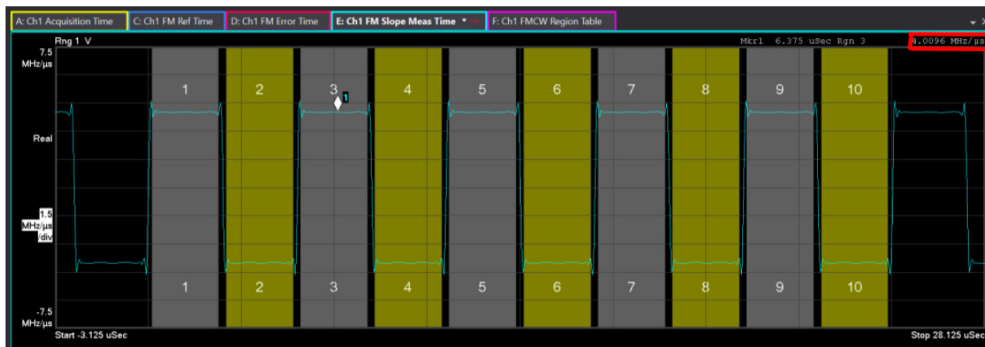


Рис. 8. Измерение крутизны характеристики ЧМ сигнала.

Показанная на рис. 8 крутизна характеризует ступенчатость ЧМ сигнала. В идеале характеристика должна быть прямоугольной. Крутизна составляет около 4 МГц/мкс. Она может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\text{Best Fit FM Slope} \frac{\text{Hz}}{\text{us}} = \frac{\text{Best Fit FM (pk - to - peak)(Hz)}}{\text{Time length(us)}}$$

Прототипирование и измерение

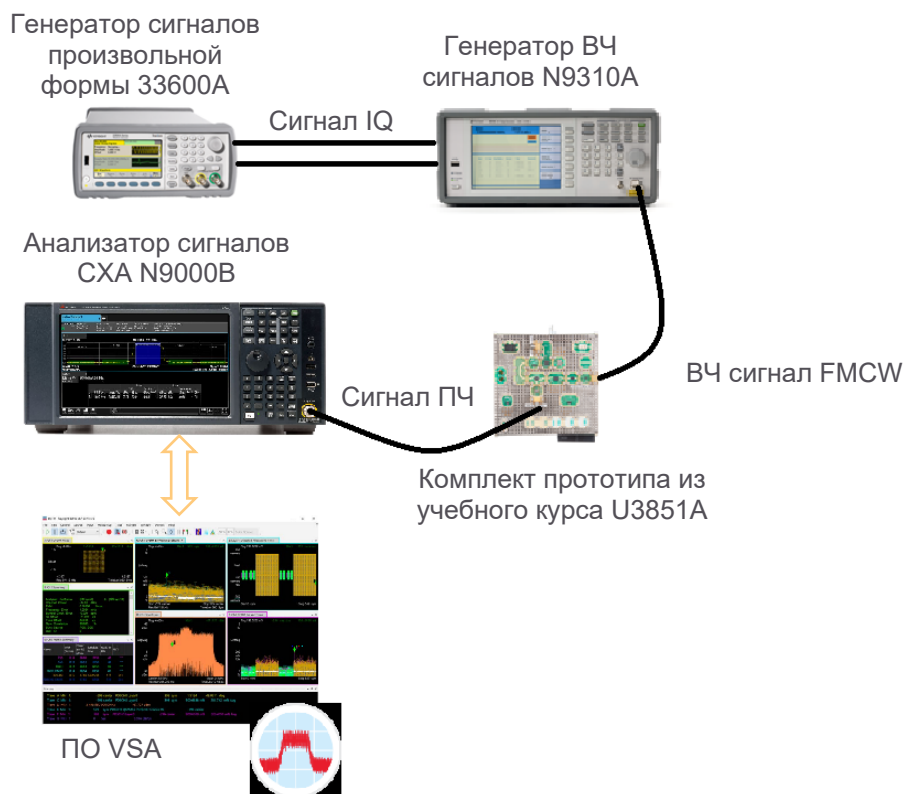


Рис. 9. Аппаратная схема измерений FMCW.

На рис. 9 показаны аппаратные средства измерений характеристик сигнала FMCW. Выгруженный из SystemVue файл CSV загружается в генератор сигналов произвольной формы через порт USB. В большинстве случаев сигнал из файла CSV легко формируется генератором ВЧ сигналов N9310A. Однако сигнал FMCW, имеющий произвольную действительную (синфазную) и мнимую (квадратурную) части, невозможно загрузить прямо в генератор ВЧ сигналов. Генератор сигналов Keysight 33600A предлагает возможность создания сигналов произвольной формы для широкополосного анализа и генерирования. С помощью этого генератора можно создавать сигнал FMCW аппаратно. Для анализа сигналов используется ПО VSA в анализаторе сигналов CXA N9000B.

Анализ результатов аппаратных измерений сигнала FMCW

По завершении сборки схемы измерений сигнал FMCW с уровнем -10 дБм подается на комплект прототипа. Результаты показаны на рисунках ниже. Выходной сигнал ПЧ (168,5 МГц) подается на анализатор сигналов N9000B. Для анализа характеристик системы используется ПО VSA. Результаты показаны на следующих рисунках.



Рис. 10. Демодулированный сигнал FMCW после понижающего преобразования и линейное изменение мощности.



Рис. 11. Демодулированный (внизу) и опорный (вверху) сигналы.

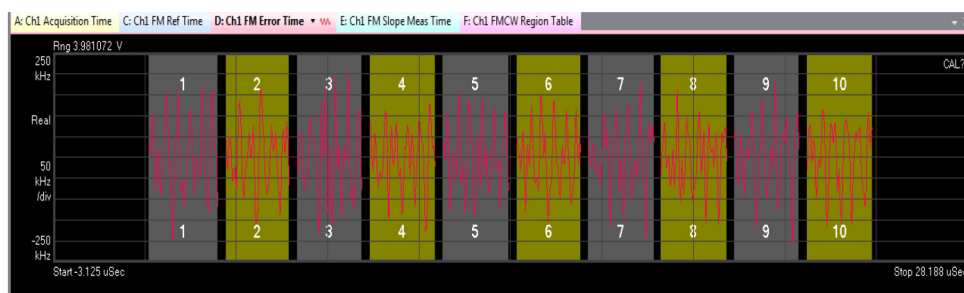


Рис. 12. Ошибка по частоте демодулированного сигнала FMCW.

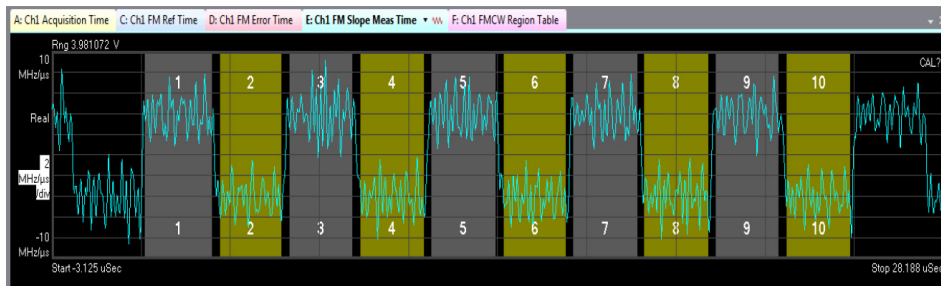


Рис. 13. Измерение крутизны характеристики ЧМ сигнала.

Выходной сигнал имеет линейную выходную мощность около -10 дБм, что оптимально для FMCW и позволяет получить треугольную форму при демодуляции. Тем не менее, абсолютная погрешность ЧМ сигнала (рис. 12) является огромной по сравнению со смоделированным результатом. Абсолютная погрешность составляет около 800 кГц пик-пик (относительная погрешность 8 %), что очень много для измерения расстояния. Одним из способов устранения этой погрешности является поиск среднего значения девиации частоты для определения разрешения по расстоянию. Показанный на рис. 13 результат измерения крутизны ЧМ сигнала имеет форму погрешности, схожую с погрешностью по частоте, показанную на рис. 12.

Заключение

Мир совершенствуется с появлением новых технологий и беспроводная связь стала одним из ключевых компонентов успеха. Важно, чтобы будущие инженеры обладали прочными знаниями в области высокочастотной техники. Учебный курс «Изучение ВЧ/СВЧ сигналов» U3851A полностью охватывает разработку ВЧ схем и может быть использован для анализа различных сигналов, например, для исследования FMCW.

Это исследование FMCW считается полным, поскольку можно выполнить понижающее преобразование сигнала FMCW с последующей демодуляцией в исходный сигнал с некоторой погрешностью ЧМ. Учебный курс U3851A является хорошим и недорогим средством обучения по сравнению с реальной автомобильной системой FMCW, работающей на частоте 77 ГГц в диапазоне W. SystemVue – это комплексное программное обеспечение моделирования, которое помогает легко построить систему.

Курс обеспечивает совершенно новый уровень обучения, начиная с задания характеристик и моделирования, и заканчивая созданием прототипов и их проверкой. Это поможет углубить знания студентов и подготовить их к практическому проектированию и тестированию ВЧ устройств. Учебный курс также позволяет анализировать сигналы не только FMCW, но и других технологий, таких как СВЧ зондирование и интроскопия (MSI), связь автомобиль-автомобиль (V2V) и другие беспроводные коммуникации Интернета вещей (BLE, LoRa).

Дополнительная информация представлена
на сайте www.keysight.com

Для получения дополнительных сведений о продукции, приложениях и услугах Keysight Technologies обратитесь в местное представительство компании Keysight. Полный перечень представительств приведен на сайте www.keysight.com/find/contactus.

