

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЗАДАЧ СИНТЕЗА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Тельминов О.А.

Московский государственный институт электронной техники
E-MAIL: otelmi@olvs.miee.ru

Рассмотрен один из факторов, влияющих на качество радиолокационного изображения – динамический диапазон зондирующего ЧМ-сигнала. Приведен ряд условий, требований и рекомендаций для разработки методов синтеза таких сигналов. Произведены разработка и моделирование нового метода сглаженных полигонов.

ВВЕДЕНИЕ

Получение изображений местности и расположенных на ней объектов с целью их изучения или определения их типа и точного местоположения производится в оптическом, инфракрасном или радиодиапазоне. В некоторых системах наблюдения производится их комплексирование для получения взаимодополняющей информации. Однако и отдельно взятый режим формирования изображения в радиолокационной форме обладает высокой устойчивостью к погодным факторам, благодаря особенностям распространения зондирующего луча.

Современный уровень радиолокационной техники позволяет размещать компактные радиолокаторы на борту подвижных средств. Излучение и прием отраженного сигнала производится с использованием фазированных антенных решеток. Диаграмма направленности такой антенны может быть легко изменена электронным способом путем пересчета фазового сдвига для каждого излучателя.

Излучение сигнала каждого излучателя производится в импульсном режиме с учетом конкретного фазового сдвига. С целью увеличения как разрешающей способности по дальности, так и расширения ее динамического диапазона (подавление паразитных боковых лепестков) при сохранении длительности зондирующих импульсов по времени применяется внутриимпульсная модуляция, в частности, частотная модуляция (ЧМ).

Полученный сигнал подвергается сжатию в фильтрах – по дальности и по азимуту. В результате формируется радиолокационное изображение. Далее следуют этапы снижения шумов на изображении, выделение характерных признаков объектов, процедуры поиска и распознавания объектов на кадре изображения или их последовательности.

Таким образом, получение приемлемого вида частотной модуляции сигнала является весьма важным этапом формирования радиолокационного изображения [1], в большой степени влияя на его качество и эффективность последующих этапов обработки.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Синтезу и исследованию сигналов с ЧМ посвящен ряд фундаментальных работ отечественных (Вакмана Д.Е., Варакина Л.Е., Гоноровского И.С., Кочемасова В.Н., Оконешникова В.С., Фальковича С.Е., Ширмана Я.Д.) и зарубежных ученых (М. Бернфельда, Б. Гольда, Ч. Кука, М. Сколника) [2].

Существующие методы ЧМ можно разделить на методы весовой обработки (Гаусса, Дольфа-Чебышева, Кайзера-Бесселя, Тейлора, Хэмминга), методы изменения формы огибающей импульса (трапецеидальной огибающей, скругления фронтов импульса, окно Тьюки), методы предискажения фазы, методы обратных пульсаций. Такие методы позволяют производить подавление паразитных боковых лепестков, однако при этом теряется разрешающая способность сжатого по дальности сигнала.

В качестве основных параметров зондирующих сигналов выступают: длительность импульса T , несущая частота f_0 , девиация частоты F , база сигнала $D = F \cdot T$.

Параллельно с этими направлениями развиваются и методы нелинейной частотной модуляции. Их смысл заключается в том, что к линейному закону изменения частоты от времени добавляется аддитивная нелинейная составляющая $f_H(t)$:

$$f(t) = \left\{ \frac{F}{T} \cdot t + f_H(t) \text{ при } |t| \leq \frac{T}{2}; 0 \text{ при } |t| > \frac{T}{2} \right\}.$$

Сжатый сигнал описывается следующими характеристиками: (1) уровень боковых лепестков, определяющий (2) динамический диапазон зондирующего устройства – возможность разрешения малоразмерных объектов на фоне крупных; (3) длительность сжатого сигнала по определенному уровню (обычно -3 дБ), определяющая разрешающую способность системы по дальности; (4) спектр

сигнала и его форма; (5) влияние смещения несущей частоты входного сигнала относительно исходной на перечисленные характеристики.

В связи с тем, что при формировании сигнала необходимо учитывать большое количество характеристик сжатого сигнала, при разработке методов формирования нелинейных ЧМ-сигналов представляется целесообразным: (1) рассмотреть способы задания кривых, обеспечивающие эффективный контроль над формой нелинейности, и адаптировать их к генерации дискретной частоты; (2) разработать математическую модель для вычисления основных характеристик сжатого сигнала и реализовать ее в компьютерной программе со средствами визуализации процесса обработки сигнала; (3) исследовать полученный класс сигналов.

Используя общий подход к проблеме расчета ЧМ-сигналов, можно выделить следующие условия, предъявляемые к синтезируемым сигналам с нелинейной ЧМ: (1) фильтр сжатия должен быть выполнен как согласованный с сигналом на его входе для получения максимального соотношения сигнал/шум на выходе; (2) длительность импульса T ограничена и строго фиксирована; (3) огибающая импульса должна быть прямоугольной формы для исключения потерь на рассогласование; (4) спектр импульса должен быть максимально плотно сосредоточен в полосе девиации; (5) уровень боковых лепестков сжатого НЧМ-сигнала должен быть ниже соответствующего уровня линейного ЧМ-сигнала; (6) чувствительность к небольшим смещениям несущей частоты должна быть минимальной.

При разработке методов необходимо последовательно выполнить этапы: (1) параметрическое формирование нелинейного закона ЧМ с визуальным контролем свойств сжатого сигнала; (2) вычисление распределения уровня боковых лепестков нелинейной функции ЧМ во всем допустимом диапазоне; (3) выбор сигналов с минимальным уровнем боковых лепестков из полученной совокупности; (4) фиксирование управляющих параметров функции частотной модуляции; (5) выполнение этапов 1...4 для другого вида нелинейности; (6) выбор лучшего сигнала из полученных на этапе 5; (7) вычисление функции неопределенности Вудворда и ее анализ; (8) анализ устойчивости сигнала к аддитивному шуму; (9) цифровая обработка: исследование эффекта дискретизации сигнала; (10) цифровая обработка: исследование эффекта квантования входного и сжатого сигналов.

Таким образом, новые методы синтеза ЧМ-сигналов основаны на поиске нелинейных функционалов, с помощью которых в конечном счете достигается требуемый динамический диапазон системы. При этом следует учитывать, что достигнутый эффект сохраняется в узком диапазоне (по отношению к сигналам с линейной ЧМ). Изменение несущей частоты приведет к необходимости выбора другого функционала.

Используем приведенные рекомендации для получения нового класса ЧМ-сигналов.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА СГЛАЖЕННЫХ ПОЛИГОНОВ

С точки зрения потерь на рассогласование и подавления боковых лепестков при сжатии ЧМ-сигнала наиболее эффективна колоколообразная форма огибающей спектра, поэтому закон изменения частоты по возможности должен иметь непрерывную первую производную. Ближе к границам полосы девиации необходимо повысить скорость нарастания частоты, в то время как в центре частота должна быть близка к линейной.

Для реализации такого закона используем контрольный полигон $\{P_0...P_4\}$, узлы которого P_1 и P_3 являются симметрично связанными относительно узла P_2 и могут перемещаться в выделенных областях, что позволяет изменять частоту во всем допустимом диапазоне (рис. 1).

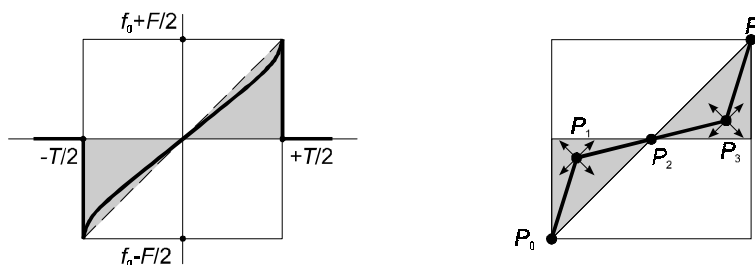


Рис. 1. Контрольный полигон для формирования частотно-временного закона

Для получения требуемого частотно-временного закона необходимо сгладить контрольный полигон $\{P_0...P_4\}$. Применим в качестве параметрических нелинейностей кривую Чайкина, В-сплайн и кривую Безье [3].

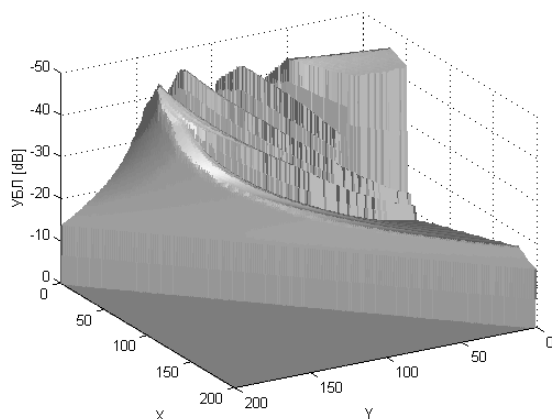


Рис. 2. Подавление боковых лепестков при перемещении узлов контрольного полигона

В результате перемещения узлов P_1 и P_3 контрольного полигона во всем диапазоне (дискретно, в пределах $0...199$ по обеим координатам) и его дальнейшего сглаживания соответствующей параметрической нелинейностью, дискретизацией и квантованием полученного закона частоты, сжатия в квадратурном фильтре рассматривается отклик модулированного импульса. Измеряется ширина центрального лепестка по уровню, степень подавления боковых лепестков. На рис. 2 приведен результат моделирования при использовании кривой Безье, базе сигнала $D=40$ (лучший результат: -44 дБ). Аналогичные значения для кривой Чайкина: -28 дБ, для В-сплайна второго порядка: -32 дБ. После фиксирования положения узла P_1 производится дальнейший анализ.

Исследование влияния частоты Доплера на сжатый сигнал показало, что значительное возрастание уровня боковых лепестков происходит при отклонении частоты от центральной более чем на 5-7%. Как и свойственно нелинейным ЧМ-сигналам, высокие показатели сохраняются лишь в малых пределах.

Эталонный непрерывный сжатый сигнал получен в среде MathCAD путем подстановки нелинейного частотного закона, представленного рядом Фурье, в классическое выражение для функции неопределенности Вудворда. Далее производится дискретизация импульсной реакции и отклика зондирующего сигнала. Установлено, что минимальное число отсчетов для корректной дискретизации находится в пределах $2...2,5$ базы D сигнала. Исследование процесса квантования сигнала и импульсной реакции фильтра показало, что для получения сигналов с подавлением -60 дБ достаточно 12-разрядного АЦП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сохранение разрешающей способности при целенаправленном подавлении уровня боковых лепестков сигнала позволяет улучшить соотношение сигнал/шум отраженного радиолокационного сигнала. Для этого в работе предложены рекомендации для перспективных методов нелинейной модуляции. Произведена разработка и моделирование одного из них – метода сглаженных полигонов.

Таким образом, практическое применение полученных методов позволяет подготовить качественную информацию для последующей обработки: сжатию по азимуту и дальности, устранению шумов на радиолокационном изображении, выделению характерных признаков для процедур поиска и распознавания объектов.

Работа выполнена благодаря частичной финансовой поддержке Гранта-2002 на проведение молодыми учеными научных исследований в ведущих научно-педагогических коллективах («Разработка принципов построения систем для обнаружения и распознавания образов в радиодиапазоне для воздушных летательных аппаратов»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны/В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др./ Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
2. Радиоэлектронные системы: средства построения и теория. Справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
3. Тельминов О.А. Метод синтеза нелинейно-частотно-модулированных сигналов с высоким динамическим диапазоном // Информационно-управляющие и телекоммуникационные системы. Межвузовский сборник. – М.:МИЭТ, 2002. с. 94 – 101.

THE ADVANCED METHODS OF FREQUENCY MODULATION OF OUTGOING PULSES FOR RADAR IMAGE SYNTHESIS

Telminov O.

Moscow State Institute of Electronic Engineering
e-mail: otelmi@olvs.miee.ru

Abstract. Dynamic range of outgoing FM-pulse is one of the factors influencing on radar image quality. The set of conditions, requirements and recommendations for these signals development are suggested. The new Smoothed Polygons Method implementation is proposed and its computer simulation is made.

Introduction. Radar beam is more robust to weather impact in comparison with optical and infrared rays. Every outgoing pulse is frequency modulated to reach short duration of treated pulse with amplified amplitude. The convolution of quadrature FM-signals processes in a compression filter (distance compression). Achievement of good results at this stage radar image forming is necessary condition for final image quality.

The advanced methods of frequency modulation. The propagated methods for synthesis linear FM-signals are methods of weighting (Gauss, Dolph-Chebyshev, Kaiser-Bessel, Taylor, Hamming), changing the shape of pulse methods (trapezium-shape, shape fillet), phase emphasis, rear pulsing methods methods. It allows to reach good enough side lobe level but the resolution of resulting signal decreases at 1.5 and more times.

Concurrent methods dedicated for nonlinear FM. Let's formulate following conditions for nonlinear FM-signals synthesis: (1) the compression filter must meet to requirements of match with input signal to reach maximum of signal-to-noise ratio on filter output; (2) the pulse duration is limited and strongly fixed; (3) the shape of pulse envelope must be squared to minimize mismatch losses; (4) the pulse spectrum must be concentrated in frequency band; (5) the side lobe level nonlinear FM-pulse must be smaller than linear one.

It is necessary to make following procedures to reach desired side lobe suppression: (1) forming of parametric nonlinearity for the law of FM; (2) allocation computing of the side lobe level in allowable range; (3) signal selection which is satisfying condition of minimal side lobe level from obtained ones; (4) control parameters of nonlinearity fixing; (5) procedures 1...4 are executing for another kind of nonlinearity; (6) signal selection with best obtained side lobe suppression but without losses of resulting signal's resolution; (7) solving the Woodward ambiguity function and its analysis; (8) analysis of signal stability with additive noise; (9) digital signal processing: signal quantization effect modelling; (10) digital signal processing: input signal and pulse response sampling effect modelling.

Thus new FM-signals synthesis methods are founded on the nonlinear functionals search which helps to reach dynamic range of outgoing FM-pulse. It is important to note that attained effect is observed in narrow bounds of frequency changes. Let's use proposed recommendations for making a new class of nonlinear FM-signals.

The new Smoothed Polygons Method implementation. For the nonlinearity law achievement we shall use control polygon $P_0...P_4$, nodes P_0 , P_2 and P_4 are immobile, pairs P_1-P_3 and P_0-P_4 are symmetric relative to the center P_2 . By moving P_1 node P_3 is moving too. Near to frequency deviation bounds it is necessary to increase frequency rate of rise but near to the center (node P_2) frequency should work for linear one. Due to moving control nodes P_1 and P_3 the frequency law may change in whole range.

Then we shall make the control polygon form more "smoothed". Let's use for it the following nonlinearity: Chaikin's curve, B-spline, Bezier curve. As a result of control nodes moving and obtaining of smoothed polygon the nonlinear frequency law forms, quantization and sampling applies to signal, pulse response and input signal is treated in the filter. For obtained compressed signal the main lobe width and the side lobe suppression are measuring. For instance, for the signal base, estimated at 40, the following results are fixed. The best suppression is for Bezier curve – less than -44 dB. For the Chaikin's curve this coefficient is -28 dB, for the second-order B-spline is -32 dB. Coefficients stability is observed under such conditions: Doppler shift – up to 5...7%, sampling – 2...2.5x(signal base), input signal and pulse response quantisation – 2^{12} levels.

Conclusion. Practical application of this methods can considerably improve the source information for following stages: distance and azimuth compression, noise suppressions on the radar image, characteristic feature allocation for image recognition etc.