

Влияние интегрального уровня боковых лепестков сигнала РСА на качество измерений

А. И. Захаров

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал (ФИРЭ РАН), 141190 Московская область, г. Фрязино, пл. Введенского, 1
e-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru*

В работе обсуждается влияние интегрального уровня боковых лепестков сигнала РСА при измерении характеристик подстилающей поверхности на примере ЛЧМ и ФКМ сигналов. Показано, что высокий интегральный уровень равномерно распределенных по дальности боковых лепестков ФКМ сигнала делает невозможными качественные измерения для слабо отражающих поверхностей по соседству с яркими объектами.

The paper discusses an influence of SAR signal integrated sidelobes level onto accuracy of measurements the underlying surface characteristics using chirp and phase modulated signals taken for a comparison. It is shown that high integrated level of phase modulated signal sidelobes, which are uniformly distributed in range, makes measurements to be impossible for dark areas in the vicinity of bright ones.

Введение

Правильный выбор параметров радиолокационного сигнала является ключевым моментом при построении такой сложной системы как радар с синтезированной апертурой. При использовании сложных сигналов с внутриимпульсной модуляцией сделать правильный выбор наиболее сложно. Двумерная автокорреляционная функция зондирующего сигнала является наиболее подходящим источником информации при выборе сигнала. Известно большое количество сигналов с внутриимпульсной модуляцией, однако наиболее часто в практических применениях используют сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и фазокодоманипулированные (ФКМ) сигналы. ЛЧМ сигналы являются типовым видом сигналов во всех современных зарубежных космических РСА землеобзора. Примеры использования ФКМ сигналов единичны. Как правило, ФКМ сигналы использовались для картирования планет. Например, периодически повторяющаяся 127-элементная М-последовательность использовалась для фазовой манипуляции при съемке поверхности планеты Венера радаром с синтезированной апертурой с борта космических аппаратов Венера-15 и 16 [1], а в американском эксперименте Магеллан по картированию Венеры [2] для бортового РСА была выбрана непериодическая 64-элементная псевдослучайная последовательность. М-последовательность используется учеными США для радиолокационного картирования поверхности Луны и планет с Земли [3].

Основные характеристики ЛЧМ и ФКМ сигналов

ЛЧМ сигнал описывается следующей формулой:

$$s(t) = \exp\left(j2\pi b\left(t - \frac{\tau_i}{2}\right)^2\right), \quad (1)$$

где b – отношение разности мгновенных частот в начале и конце импульса, или девиации частоты f_{dev} к длительности импульса τ_i . Сечения функции неопределенности ЛЧМ сигнала длительностью τ_i имеют следующий вид по осям запаздывания и частоты:

$$c(\tau, 0) = (\tau_i - |\tau|) \sin c(\pi b \tau (\tau_i - |\tau|)), \quad (2)$$

$$c(0, f) = \sin c(\pi f \tau_i). \quad (3)$$

Разрешение по запаздыванию, как ширина главного лепестка функции из (2), равно $1/f_{dev}$. Разрешение по частоте примерно равно $1/\tau_i$. Известно, что уровень первого бокового лепестка по мощности равен -13 дБ. Интегральный уровень боковых лепестков ЛЧМ сигнала по дальности равен -11 дБ.

Сигналы с фазокодовой модуляцией, или ФКМ сигналы – один из очень немногих видов сигналов, также используемых в радиолокации. ФКМ сигнал задается следующей формулой:

$$s(t) = \exp(j2\pi ft + \varphi_k), \quad (4)$$

где фаза φ_k принимает некоторые дискретные значения. Например, для бинарного кодирования фаза $\varphi_k = 0$ или π , в зависимости от значения текущего элемента кода. М-последовательность или последовательность сдвигового регистра – один из вариантов таких кодов. Длина М-последовательности определяется количеством разрядов сдвигового регистра m и равна $N=2^m-1$. Характерной особенностью корреляционной функции непериодической М-последовательности является острый пик единичного уровня при нулевом сдвиге с равномерным шумовым пьедесталом мощностью примерно $1/N$. Разрешение по дальности равно длительности элементарного импульса τ_i , в течение которого фаза φ_k принимает фиксированное значение 0 или π . Интегральный уровень боковых лепестков М-последовательности равен -8 дБ независимо от длины кода. У периодической М-последовательности уровень боковых лепестков равен $1/N^2$, а интегральный уровень составляет $1/N$. Поскольку для РСА землеобзора характерным является использование непериодических сигналов, периодическая М-последовательность далее не рассматривается.

Сравнивая разрешающую способность ЛЧМ и ФКМ сигналов по дальности, определяемую шириной главного лепестка, можно сказать, что эти сигналы примерно одинаковы. Главное различие этих сигналов – в форме и величине боковых лепестков автокорреляционной функции (АКФ) по дальности. Максимальный боковой лепесток ЛЧМ сигнала равен -13 дБ. При использовании длинных М-последовательностей средний уровень боковых лепестков АКФ может быть весьма малым. Так, для последовательности длиной 8191 он равен ~ -39 дБ, что при картировании точечных целей является очевидным преимуществом. Однако, при съемке протяженных объектов просачивание сигналов удаленных объектов через боковые лепестки АКФ может оказаться существенным.

Проанализируем мешающее влияние боковых лепестков ЛЧМ и ФКМ сигналов на примере реализаций длиной 127 элементов. На рис. 1. приведен интегральный уровень боковых лепестков SI в зависимости от их удаленности от главного лепестка для анализируемых сигналов, которые вычислены по формуле

$$SI_k = \sum_{n=k}^{126} AKF_n, \quad (5)$$

где AKF_n - отсчеты АКФ сигнала. Этот параметр позволяет оценить интегральный уровень удаленных боковых лепестков сигнала, начиная с k -го элемента до конца АКФ.

На этом рисунке видно, что у ЛЧМ сигнала основной вклад вносят несколько первых лепестков. Начиная с 5-го лепестка интегральный уровень мешающих отражений не превышает -20 дБ. У ФКМ сигнала интегральный уровень начинается с -8 дБ и держится выше -10 дБ практически до середины АКФ. Видно, что по этому показателю ФКМ сигнал хуже ЛЧМ сигнала примерно на 10 дБ.

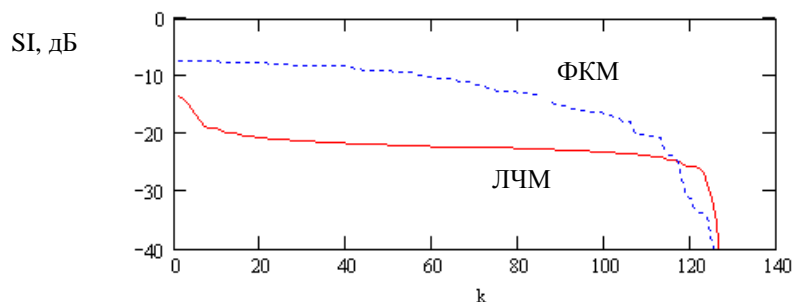


Рис. 1. Интегральный уровень удаленных боковых лепестков ЛЧМ (сплошная линия) и ФКМ (прерывистая линия) сигналов.

Следствием этой особенности АКФ ФКМ сигнала будет сильное влияние весьма удаленных протяженных объектов на качество выделения полезного сигнала в главном лепестке АКФ.

Моделирование: съемка поверхности со ступенчато меняющейся яркостью

Проведем сравнение ЛЧМ и ФКМ сигналов на примере радиолокационной съемки модельной поверхности с удельной эффективной площадью рассеяния (УЭПР) i -го элемента поверхности σ_i^0 и случайной начальной фазой φ_i^0 , распределенной равномерно на интервале $[0; 2\pi)$. Выражение для реализации сигнала поверхности может быть записано в следующем виде:

$$a_i = \sqrt{\sigma_i^0} \exp(j\varphi_i), \quad \varphi_i \in [0; 2\pi), \quad (6)$$

где i - номер отражающего элемента поверхности.

Пусть сравниваемые зондирующие ЛЧМ и ФКМ сигналы имеют длину 8191 отсчет, длительность бока ФКМ сигнала и девиация частоты ЛЧМ сигнала обеспечивают разрешение по поверхности 1 м. Зададим снимаемую поверхность в виде трех участков различной яркости, так что для элементов 12000-20000 $\sigma^0 = 0$ дБ, а для участков слева и справа – на некоторую величину S меньше.

Отраженный сигнал поверхности r_i при использовании длинного зондирующего импульса можно записать в виде свертки

$$r_i = \sum_{j=0}^{N-1} s_{i-j} m_j,$$

где m_j – отсчеты зондирующего импульса. Следует отметить, что при длине 8191 отсчет и разрешении 1 м по поверхности в каждом отсчете содержится информация об участке поверхности длиной около 8 км.

Для получения высокого разрешения необходимо провести согласованную фильтрацию отраженного сигнала с использованием копии зондирующего сигнала, которая обычно выполняется в частотной области с использованием алгоритма БПФ. Восстановленное таким образом изображение высокого разрешения можно сравнить по интенсивности и фазе с исходным, чтобы оценить искажающее влияние свойств зондирующего сигнала. На рис. 2 и 3 ниже приводятся графики УЭПР отражающей поверхности и ошибки измерения начальной фазы сигнала поверхности, как разности фаз исходного сигнала и полученного после съемки и согласованной фильтрации, для ЛЧМ и ФКМ сигналов. В данном примере УЭПР центрального участка длиной 8192 отсчета на $S=8$ дБ больше, чем окружающих участков.

На графиках фазовой ошибки особенно хорошо виден недостаток ФКМ сигнала по сравнению с ЛЧМ. Если в пределах ярко отражающей поверхности (пиксели 12000-20000) боковые лепестки ЛЧМ сигнала приводят к фазовым ошибкам порядка 3° , то у

ФКМ они достигают 20° , что означает в 7 раз более низкую точность измерений фазы. Наиболее разительно влияние боковых лепестков ФКМ сигнала на слабо отражающей поверхности по соседству с ярко отражающей. Если у ЛЧМ на участке с пикселями 5000-12000 фазовая ошибка возрастает до 5° , то у ФКМ – до 60° , что делает фазовые измерения практически неинформативными. На графиках УЭПР также заметно деструктивное влияние боковых лепестков, приводящее к сильному зашумлению участка изображения низкой яркости по соседству с ярким участком.

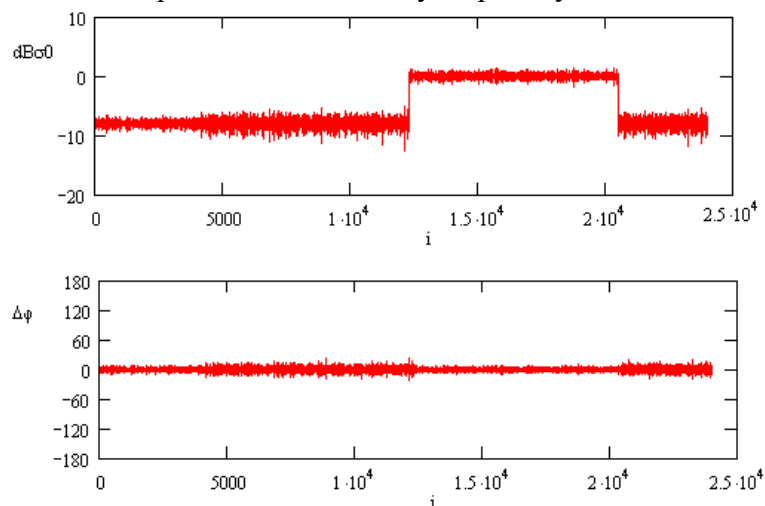


Рис. 2. УЭПР и ошибки фазы для ЛЧМ сигнала при скачке УЭПР 8 дБ

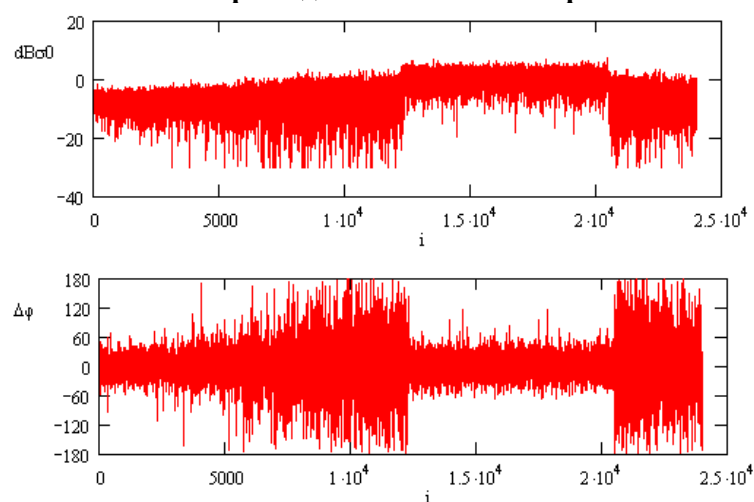


Рис. 3. УЭПР и ошибки фазы для ФКМ сигнала при скачке УЭПР 8 дБ

Можно утверждать, что при использовании М-последовательности длиной 8191 отсчет для радара с разрешением 1 м измерения в полосе слабо отражающей поверхности шириной более 4 км по соседству с яркой протяженной областью становятся мало достоверными.

Моделирование: съемка реальной поверхности радаром X-диапазона.

УЭПР реальных объектов поверхности в X-диапазоне, равно как и структура поверхности могут меняться в больших пределах. Для иллюстрации результатов исследования в условиях, приближенных к реальным, можно взять радарные изображения, полученные с борта аппарата Шаттл в 1994 году в X-диапазоне. Имеющиеся радарные изображения по Подмосковию, району ЧАЭС, побережью Каспия, Забайкалью позволили исследовать различные формы поверхности с УЭПР в широком диапазоне значений. В ходе моделирования реальные значения УЭПР

пикселей этих изображений подставлялись в (6). Поскольку расстояние между пикселями использованных в моделировании изображений равно 12.5 м, при моделировании использовались 511-элементные реализации зондирующего сигнала, чтобы обеспечить сопоставимую ширину (6 км) мешающих участков поверхности.

Оказалось, что для естественных покровов равнинных районов перепады УЭПР находятся чаще всего в пределах 5-7 дБ, что приводит к некоторому усилению искажений информации при использовании М-последовательностей. Более сильные перепады УЭПР характерны для урбанизированных и хозяйственных территорий. Вследствие этого сигнал поверхности внутриквартальных территорий заметно искажается из-за сильного отраженного сигнала соседних домов и других построек. Слабый сигнал гладких естественных объектов типа невспаханых полей или искусственных – автодорог, полос аэродромов сильно забивается сигналом более яркого окружения. Наиболее впечатляющими являются искажения сигнала пересеченного рельефа в гористой местности. На рис. 4 приведен фрагмент изображения горного рельефа Голондинского хребта в Забайкалье.

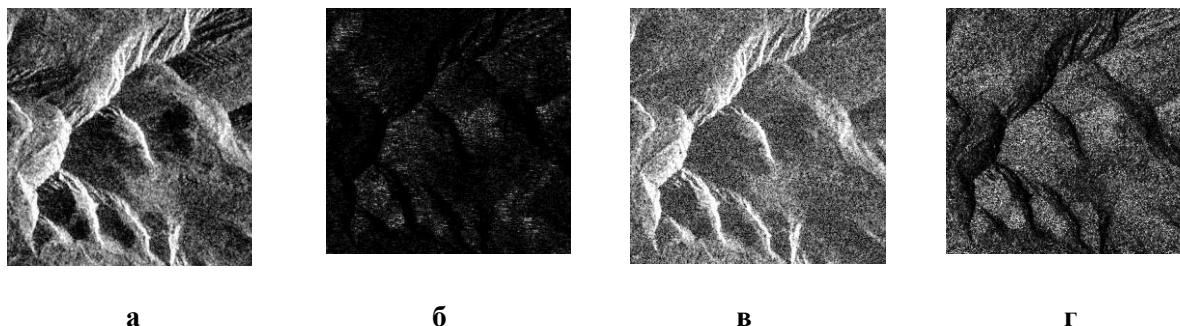


Рис. 4. а, б: изображение и карта фазовых ошибок при использовании ЛЧМ сигнала, в, г: изображение и карта фазовых ошибок в случае использования ФКМ сигнала

Значительные перепады яркости – от +5 дБ на передних склонах хребтов до –15 дБ на задних склонах – приводят к заметному искажению яркости слабо отражающих задних склонов сигналом ярких передних склонов и практически полной потере информации о начальной фазе сигнала при использовании М-последовательности. У ЛЧМ-сигналов, как видно, искажения не столь заметны. Сильные искажения фазы могут быть непреодолимым препятствием для использования М-последовательностей, например, при создании систем интерферометрической съемки рельефа

Заключение

Проведённые исследования позволяют сделать следующий вывод: высокий интегральный уровень равномерно распределенных по дальности боковых лепестков ФКМ сигналов делает невозможными качественные измерения УЭПР и фазы отраженного сигнала для слабо отражающих поверхностей по соседству с яркими.

Литература

1. Александров Ю.Н., Дубровин В.М., Захаров А.И., и др., Создание радиолокационной карты планеты Венера.- в сб. Проблемы современной радиотехники и электроники, М:Наука, 1987, С. 46.
2. Johnson W.T.K., Magellan imaging radar mapping mission, Proc. IEEE, 1991, V 79, Issue 6, P. 777.
3. B. A. Campbell, et al, Earth-based 12.6-cm wavelength radar mapping of the Moon: New views of impact melt distribution and physical properties, Icarus, 2010, v 208, p 565.