

Особенности применения вобуляции межимпульсного интервала для снижения неоднозначности по дальности в РСА космического базирования

О.А. Карпов¹, В.В. Костров^{2,3}, В.П. Макаров⁴, А.В.Ракитин^{2,3}, Е.Ф.Толстов¹

¹ АО «Аэрокон», 140187 г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1

² Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, 23

³ АО «НИИ «Субмикрон», 124498, РФ, г. Москва, Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2
E-mail: kostrov.46@mail.ru

⁴ АО «НПО Лавочкина» 141402, Московская область, г. Химки, ул. Ленинградская, д. 24,

Рассмотрены общие вопросы снижения уровня сигналов неоднозначности по дальности при формировании радиолокационных изображений. Приведена классификация основных методов подавления сигналов неоднозначности и их особенности применения в радиолокаторах с синтезированием апертуры антенны (РСА) космического базирования. Более детально рассмотрен метод с использованием малой вобуляции периода следования зондирующих сигналов, который позволяет рассеять мощность эхо-сигналов с рекуррентных периодов по радиолокационному изображению. Приведены результаты моделирования и синтеза радиолокационных изображений для РСА X-диапазона, работающего в маршрутном режиме обзора при максимальном разрешении.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры (РСА), неоднозначность по дальности, зондирующий сигнал, вобуляция, межимпульсный интервал, маршрутный режим.

Features of the use of pulse-to-pulse interval wobble to reduce range ambiguity in space-based SAR

O.A. Karpov¹, V.V. Kostrov^{2,3}, V.P. Makarov⁴, A.V. Rakitin^{2,3}, E.F. Tolstov¹

¹ JSC Aerocon

² Murom Institute of Vladimir State University

³ JSC Research Institute Submicron

⁴ JSC Lavochkin Association

The general issues of reducing the level of range ambiguity signals in the formation of radar images are considered. The classification of the main methods of signal suppression of ambiguity and their application features in space-based synthetic aperture radar (SAR) is given. A method using a small wobble of the probing signal period is considered in more detail, which allows the power of echo signals from recurrent periods to be scattered over the radar image. The results of modeling and synthesis of radar images for X-band radar operating in the route survey mode at maximum resolution are presented.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), range ambiguity, probing signal, wobble, pulse interval, strip-map mode.

Введение

В настоящее время радиолокаторы с синтезированием апертуры антенны (РСА) космического базирования представляют собой высокоинформативные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1]. Достигнутые за последние годы высокая точность и разрешающая способность РСА сделали их сопоставимыми с оптическими средствами ДЗЗ [2]. Одной из тенденций, которая наблюдается в

последние годы, является переход к применению сравнительно компактных радиолокаторов на базе малых космических аппаратов и ракет-носителей легкого класса [2]. При этом снижение габаритов антенной системы приводит к расширению ширины диаграммы направленности и снижению качества радиолокационных изображений (РЛИ) из-за помех неоднозначности, возникающих от рекуррентных периодов дальности. Для решения проблемы неоднозначности по дальности и азимутальной координате используются различные методы и алгоритмы [3–6].

Целью работы является оценка достижимого снижения уровня помех неоднозначности на РЛИ при использовании малой вобуляции зондирующих сигналов РСА космического базирования X-диапазона в маршрутном режиме съемки.

Выбор периода следования импульсов

Частота повторения зондирующих импульсов F_n является важнейшим параметром РСА космического базирования, от выбора которого существенно зависят качественные показатели синтезируемого РЛИ. В частности, если при определении F_n выполнить условие [4]

$$\frac{2V_{КА}\theta_a k_a}{\lambda} \leq F_n \leq \frac{C}{2\Delta R k_u}, \quad (1)$$

то помехи, вызванные неоднозначностью приема по азимуту и дальности, не будут превышать минус 20 дБ относительно основного сигнала [1]. Здесь $V_{КА}$ – скорость КА относительно Земли; θ_a – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) по азимуту; C – скорость света; k_a , k_u – коэффициенты избыточности по азимуту и дальности соответственно; ΔR – интервал наклонной дальности, на котором присутствует отраженный от поверхности сигнал (см. рис. 1); γ_n – угол падения волн.

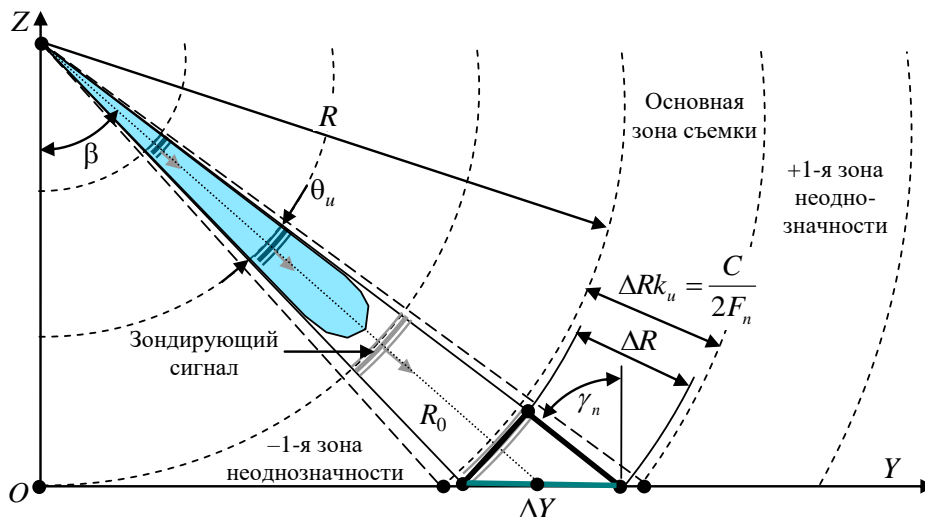


Рис. 1. Распространение сигнала в плоскости поперечной дальности

С учетом кривизны Земной поверхности угол падения луча ДНА от местной вертикали определяется по формуле

$$\gamma_n = \arccos\left(\frac{2R_Z H_{КА} + H_{КА}^2 - R_0^2}{2R_Z R_0}\right) = \arcsin\left(\frac{R_Z + H_{КА} \sin \beta}{R_Z}\right),$$

где $R_Z = 6371$ км – радиус Земли, $H_{КА}$ – высота орбиты КА, R_0 – дальность до центра зоны съемки, β – угол отклонения луча ДНА от надира (угол визирования).

При маршрутной съемке допустимо выбрать $k_a = 1,2...1,5$. В прожекторном и обзорном режимах $1 < k_a \leq 2$. Типовое значение коэффициента избыточности по дальности лежит в пределах $k_u = 1,2...1,4$ [1]. С использованием угла падения определяются некоторые геометрические параметры съемки: $\Delta Y = \Delta R / \sin \gamma_n$ – размер кадра основной зоны съемки по дальности на Земле; $\Delta R \approx \theta_u R_0 \operatorname{tg} \gamma_n$ – размер кадра зоны съемки по наклонной дальности (θ_u – ширина ДНА по углу места).

Прием пачки эхо-сигналов в РСА космического базирования ведется, как правило, в условиях неоднозначных измерений. До начала приема излучаются десятки зондирующих сигналов, что налагает дополнительные ограничения на систему управления окном приемника. При этом кроме сигналов от основного объекта съемки в окно приемника поступают эхо-сигналы с рекуррентных периодов дальностей

$$R_{pn} = R_0 + 0,5nCT_n, \quad (2)$$

где R_0 – расстояние до центра объекта съемки; n – номер рекуррентного периода, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; T_n – период следования зондирующих импульсов. На рис.1 показаны две зоны неоднозначности с номерами $n = -1$ и $n = +1$.

Сигналы с этих дальностей увеличивают уровень фона и оказывают отрицательное влияние на характеристики РЛИ. Мощные сигналы ложных целей, вызванные помехами неоднозначности, статистически не отличимы от эхо-сигналов объекта съемки, поэтому такие сигналы могут вызывать наложение дополнительных (ложных) изображений на основное [1]. Естественно, что это затрудняет работу оператора по дешифрированию РЛИ, вызывает дополнительные погрешности при измерении координат, определении скорости, классификации целей и т.п.

При проектировании режима работы РСА период следования согласуется с геометрическими параметрами съемки и рассчитывается по наклонной дальности до центра зондируемой сцены, куда направляется максимум ДНА,

$$T_n = (k_{pr} + 0,5)^{-1} \cdot 2R_0 / C, \quad (3)$$

где $k_{pr} = 1, 2, \dots, k_{pr \max}$ – число зондирующих импульсов до начала приема сигналов.

Для снижения отрицательных эффектов наложения ложных изображений на основное РЛИ могут быть использованы специальные методы подавления сигналов неоднозначности. В первую очередь они связаны, как подсказывает соотношение (2), с необходимостью нарушения регулярности (периодичности) зондирующих сигналов. Нарушить детерминированный характер сигналов от зон неоднозначного приема по дальности можно за счет изменения периода следования зондирующих импульсов T_n , т.е. за счет вобуляции межимпульсного интервала, при которой изменение периода составляют единицы процента. Вобуляция периода повторения позволяет раздробить энергию эхо-сигналов от целей, расположенных за пределами однозначного измерения дальности, и тем самым снизить вероятность их обнаружения [7].

Другим направлением снижения помех неоднозначности является отделение сигналов рекуррентных периодов дальностей от основного сигнала с $n = 0$, что позволяет снизить межпериодную взаимную корреляцию зондирующих сигналов. Для этих целей необходимо использовать ортогональные или квазиортогональные сигналы, которые обладают свойством

$$\int_0^T S_0(t)S_n(t)dt \cong 0, \quad (4)$$

где $S_0(t)$ – сигнал, соответствующий зоне объектовой съемки; $S_n(t)$ – сигналы с рекуррентных периодов дальностей; T – длительность сигнала. В РСА могут быть

использованы все четыре вида ортогональности: кодовая, временная, частотная и пространственная.

Пределы вобуляции зондирующих импульсов

В процессе съемки изменение межимпульсного интервала можно осуществлять в ограниченных пределах. Это следует с одной стороны из свойств сжатого сигнала после обработки, а с другой стороны – из временных диаграмм зондирующих сигналов и интервалов управления. Будем также полагать, что межимпульсный интервал может изменяться от своего номинального значения как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения.

Минимальное значение времени вобуляции выбирается таким образом, чтобы помеха наложения не искажала основной лепесток сжатого сигнала. На рис. 2 приведен отклик согласованного с ЛЧМ сигналом фильтра (без весовой обработки), на рис. 3 – с ФКМ сигналом при соотношении частоты дискретизации к девиации частоты равном 2. В любом случае эхо-сигнал неоднозначных зон не должен попадать в основной лепесток и накладываться на мощный боковой лепесток. Это требование приводит к минимальному значению времени вобуляции $T_{vob\ min} = (2,2...3)\tau_0$, где τ_0 – длительность главного отклика в функции неопределенности ($\tau_0 = 1/\Delta f_s$, Δf_s – ширина спектра сигнала). Это условие легко выполняется для ЛЧМ сигнала в силу регулярности, однако в случае весовой обработки ширина основного лепестка по нулям увеличивается и зависит от вида взвешивающей функции. В случае ФКМ сигнала положение нулей ФН зависит от вида модулирующей ПСП, поэтому выполняется приближенно и требует уточнения под конкретный сигнал.

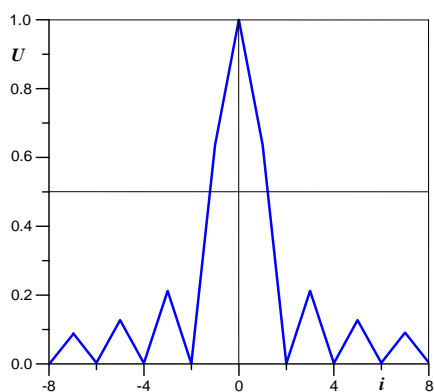


Рис. 2. АЧФ сигнала с ЛЧМ

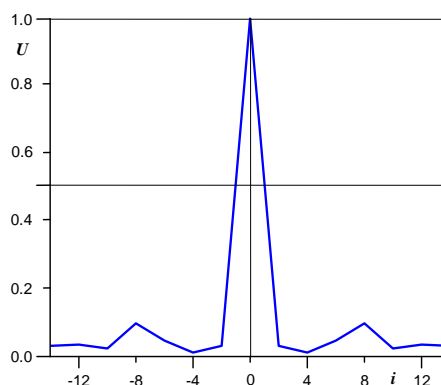


Рис. 3. АЧФ сигнала с ФКМ

При определении девиации межимпульсного интервала приходится учитывать множество факторов. В основу рассмотрения положим типовую обобщенную диаграмму сигналов и интервалов управления, которая представлена на рис. 4. На рисунке раскрыт промежуток времени между двумя зондирующими сигналами ЗС. Имеем следующую последовательность сигналов и интервалов:

Имеем следующую последовательность сигналов и интервалов:

- длительность зондирующего сигнала (ЗС) $T_{ИЗЛ}$;
- период повторения ЗС T_n , частота повторения $F_n = 1/T_n$;
- защитный интервал $T_{зПРД}$ до и после окончания ЗС, который входит в строб радиопередающего устройства длительностью $T_{стробПРД}$;
- строб РПДУ включает в себя ЗС и два защитных интервала $T_{зПРД}$ перед началом и после излучения ЗС;

- интервалы времени П1 и П2 длительностью $T_{перекл}$, необходимые для переключения луча с передачи на прием и смены поляризации излучаемого и принимаемого сигналов;
- время задержки строба приемника $T_{задерж}$ – интервал между окончанием зондирующего сигнала и включением приемника;
- строб радиоприемного устройства длительностью $T_{ПРМ}$, в течение которого осуществляется прием эхо-сигналов с выбранного направления, плюс длительность зондирующего сигнала $T_{ИЗЛ}$.

В случае двойного поляризационного приема, когда используется общий передатчик и двухканальное радиоприемное устройство, число служебных интервалов уменьшается, что позволяет расширить диапазон вобуляции.

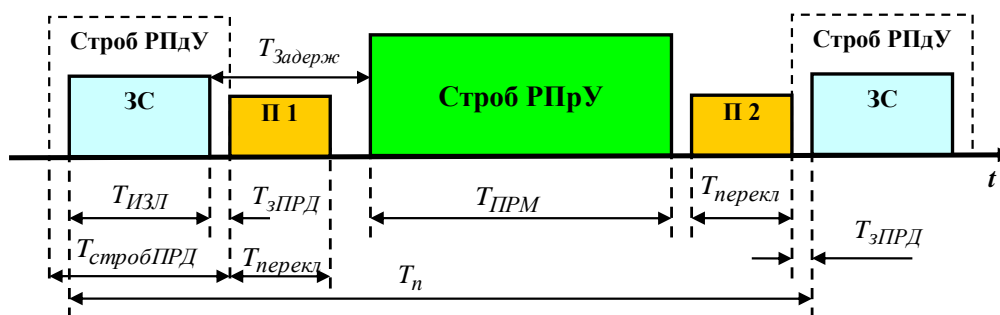


Рис. 4. Типовая обобщенная диаграмма временных соотношений

Поскольку период следования зондирующих импульсов зависит от многих факторов, в частности от режима съемки и параметров передатчика, а его значение ограничено сверху и снизу, то пределы максимальной вобуляции также ограничены.

Для примера рассмотрим один из проектных вариантов современного космического РСА [8] с АФАР X диапазона, некоторые параметры которого представлены в таблице 1. Эти параметры РСА были положены в основу расчетов базовых режимов съемки.

Таблица 1. Исходные параметры для расчета характеристик РСА X диапазона

Параметр	Значение
Высота орбиты КА, км	514
Режим съемки	маршрутный
Частота следования импульсов, кГц	2...6,5
Длина волны на центральной частоте, см	3,11
Полоса рабочих частот Δf_s , МГц	125
Частота дискретизации, МГц	150
Ширина зоны съемки по азимуту на Земле, км	до 50,0
Ширина зоны съемки по дальности на Земле, км	до 30,0
Угол визирования, градусы	20...45
Размеры антенны, м (по вертикали \times по горизонтали)	0,7 \times 4,8
Пространственное разрешение на поверхности Земли, м	1,55...3,21

Рассмотрим минимальную длительность периода следования T_{min} . Из рис. 4 видно, что в рассматриваемом случае $T_{зад} = T_{зПРД} + T_{перекл}$ и $T_{min} = T_{ИЗЛ} + 2T_{зад} + T_{ПРМ}$. Минимальная длительность строба приемника определяется размером снимаемой

сцены и углом визирования. Для предельного режима с полосой съемки $\Delta R_{\text{съемки}}$ получаем минимальную длительность строга $T_{\text{стрПРУ}} = 2\Delta Y \cdot \sin \gamma_n / C + T_{\text{изл}}$.

Длительность импульса излучения $T_{\text{изл}}$ определяет энергию зондирующего сигнала, поэтому при постоянной частоте следования импульсов целесообразно максимизировать $T_{\text{изл}}$. Длительность импульса излучения в РСА обычно составляет $T_{\text{изл}} = 5 \dots 50$ мкс.

Длительность импульса ограничена сверху скважностью зондирующих импульсов, которая рассчитывается как отношение периода повторения импульсов к длительности импульса излучения $Q = T_n / T_{\text{изл}}$. Для приемопередающих модулей АФАР критическим значением скважности является ее наименьшее значение, поскольку в этом случае обостряется проблема теплоотвода. В зависимости от элементной базы прием допустимое минимальное значение $Q_{\text{мин}} = 6 \dots 10$.

Длительность стробирующего импульса передатчика включает в себя, кроме длительности импульса, два защитных интервала $T_{\text{зПРД}}$, в течение которых переключатели передача-прием, усилитель мощности подготавливаются к прохождению сигнала, а после прохождения импульса – проходят все переходные процессы. Отсюда получаем соотношение для расчета минимального периода следования

$$T_{\text{мин}} = 2(T_{\text{изл}} + T_{\text{зПРД}} + T_{\text{перекл}}) + 2\Delta Y \cdot \sin \gamma_n / C$$

при ограничении $T_{\text{мин}} / T_{\text{изл}} \leq Q_{\text{мин}}$.

Максимальный период следования ограничен условиями теоремы В.А.Котельникова для корректного отображения траекторного сигнала, из которой следует

$$T_{\text{nmax}} = 1 / (2F_{d\text{max}}),$$

где $F_{d\text{max}} = V_{\text{КА}} L_s / (\lambda R_H)$ – максимальное доплеровское отклонение по модулю частоты отраженного сигнала на краях синтезированной апертуры длиной L_s ; $V_{\text{КА}}$ – орбитальная скорость КА; λ – длина волны излучаемого сигнала; R_H – наклонная дальность.

Для снижения уровня помех азимутальной неоднозначности частоту дискретизации увеличивают и выбирают $F_{\text{nmin}} = k_{pd}(2F_{d\text{max}})$, где $k_{pd} \geq 1$ – коэффициент передискретизации, показывающий во сколько раз частота дискретизации больше граничной частоты сигнала. На рис. 5 представлены граничные зависимости минимального T_{nmin} и максимального T_{nmax} периода следования от угла визирования β при постоянных остальных параметрах РСА. Пунктиром на этом же рисунке приведена ограничительная линия при скважности $Q = 8$. Приведенные значения T_{nmin} и T_{nmax} определяют общие пределы изменения периода следования.

Внутри межимпульсного интервала возможна малая вобуляция, пределы которой определяются возможностью перемещения строга приемника между зондирующими импульсами и сигналами управления. Тогда $T_{n0} = T_n$ принимается за среднее значение, вокруг которого происходит изменение межимпульсного интервала $T_{\text{vob}}(j)$, где j – номер зондирования. На рис. 6 показан пример зависимости максимального значения малой вобуляции от k_{pr} , который показывает, что с ростом числа зондирующих импульсов до начала приема эхо-сигналов диапазон возможной вобуляции снижается.

При расчетах кроме параметров таблицы 1 использовались следующие параметры циклограммы: длительность защитного интервала 0,5 мкс; длительность переключения поляризации и луча 7,5 мкс.

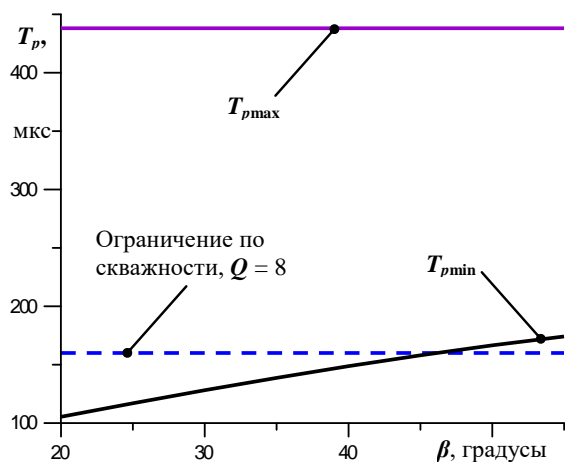


Рис. 5. Пределы изменения периода следования ЗС

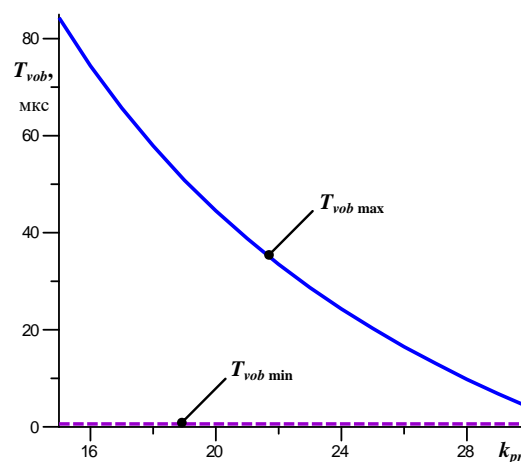


Рис. 6. Максимальное значение времени вобуляции

Шаг вобуляции ΔT_{vob} определим из следующих соображений. Будем полагать, что в процессе основного режима съемки РСА использует зондирующий сигнал одного и того же типа. Чтобы обеспечить ортогональность эхо-сигналов основной сцены и рекуррентных периодов, можно использовать временное разделение сигналов. В случае простого сигнала с идеальной АКФ, у которой отсутствуют боковые лепестки, два импульсных сигнала достаточно разнести на $\Delta T_{vob} = 2\tau_0$. Для практически важного случая сложных сигналов необходимо учитывать боковые лепестки, поэтому шаг вобуляции ΔT_{vob} желательно увеличивать $\Delta T_{vob} \geq (2,2...3)\tau_0$. В рассматриваемом примере получаем от 300 (при $k_{pr} = 30$) до 4500 (при $k_{pr} = 15$) дискрет изменения межимпульсного интервала.

Результаты моделирования

Для оценки эффективности применения вобуляции межимпульсного интервала проводилось математическое моделирование. Основные параметры режима съемки рассчитывались в соответствии с таблицей 1. При выбранном угле визирования, равном 45° , наклонная дальность составила 758,9 км, $k_{pr} = 20$. Для уменьшения объема данных длительность зондирующего импульса, который представлял собой радиосигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), была принята равной 8 мкс (база сигнала 1000). При полосе сигнала 125 МГц разрешение по наклонной дальности составляет 1,2 м, а дискрет – 0,008 мкс. Параметры вобуляции, которые использовались в процессе моделирования: максимальное отклонение от среднего значения 10 мкс (полная девиация межимпульсного интервала 20 мкс); шаг изменения $\Delta T_{vob} = 5$ пикселей (0,04 мкс); число дискрет вобуляции до 500. В качестве закона изменения периода следования рассматривались 3 варианта: 1) $T_{vob}(j)$ представляет собой функцию меандра с изменением от среднего значения на два положения $\Delta T_{vob} = \pm 10$ мкс; 2) $T_{vob}(j)$ – синусоидальная функция дискретного времени с амплитудой 10 мкс; 3) $T_{vob}(j)$ – последовательность независимых случайных величин с равномерной плотностью распределения вероятностей (ПРВ) в пределах $\Delta T_{vob} = [-10... + 10$ мкс].

На рис. 7 для различных структур зондирующих последовательностей представлены голограммы траекторного сигнала с ЛЧМ (реальная составляющая), полученные путем моделирования эхо-сигналов от точечной цели. Горизонтальная ось соответствует азимутальной координате, вертикальная – наклонной дальности. На рис. 7а для сравнения приведена центральная часть радиоголограммы (РГ) траекторного сигнала для стандартного маршрутного режима без вобуляции. Такая радиоголограмма каких-то особенностей не имеет, аналогичные изображения можно найти в [1]. Вобуляция по закону меандра приводит к сдвигу столбцов РГ по вертикали (на рис. 7б представлено 4 периода модуляции). Структура РГ на отдельных участках полностью сохраняется, изменяется лишь положение на оси наклонной дальности.

Вобуляция по синусоидальному закону в отличие от меандра приводит к более плавному изменению изображения РГ. На рис. 7в показана РГ с одним периодом модуляции $T_n(j) = T_{n0} + T_{vob}(j)$. Ясно, что как в случае модуляции T_n по закону меандра, так и в случае синусоидальной модуляции изображение исходной РГ (рис. 7а) рассеивается по плоскости «азимут-дальность», поэтому на заключительном этапе синтеза РЛИ – сжатии траекторного сигнала по азимутальной координате – когерентное накопление будет давать меньший уровень, чем при отсутствии вобуляции. Из анализа соотношения (2) следует, что чем меньше регулярность и периодичность сечений РГ по строкам (одинаковой дальности), тем ниже будет уровень ложных сигналов неоднозначностей. На рис. 7г приведена РГ для случая модуляции T_n по закону случайных величин с равномерной ПРВ. Видно, что исходная РГ рассеяна по плоскости «азимут-дальность», поэтому следует ожидать высококачественное подавление помех неоднозначности по дальности.

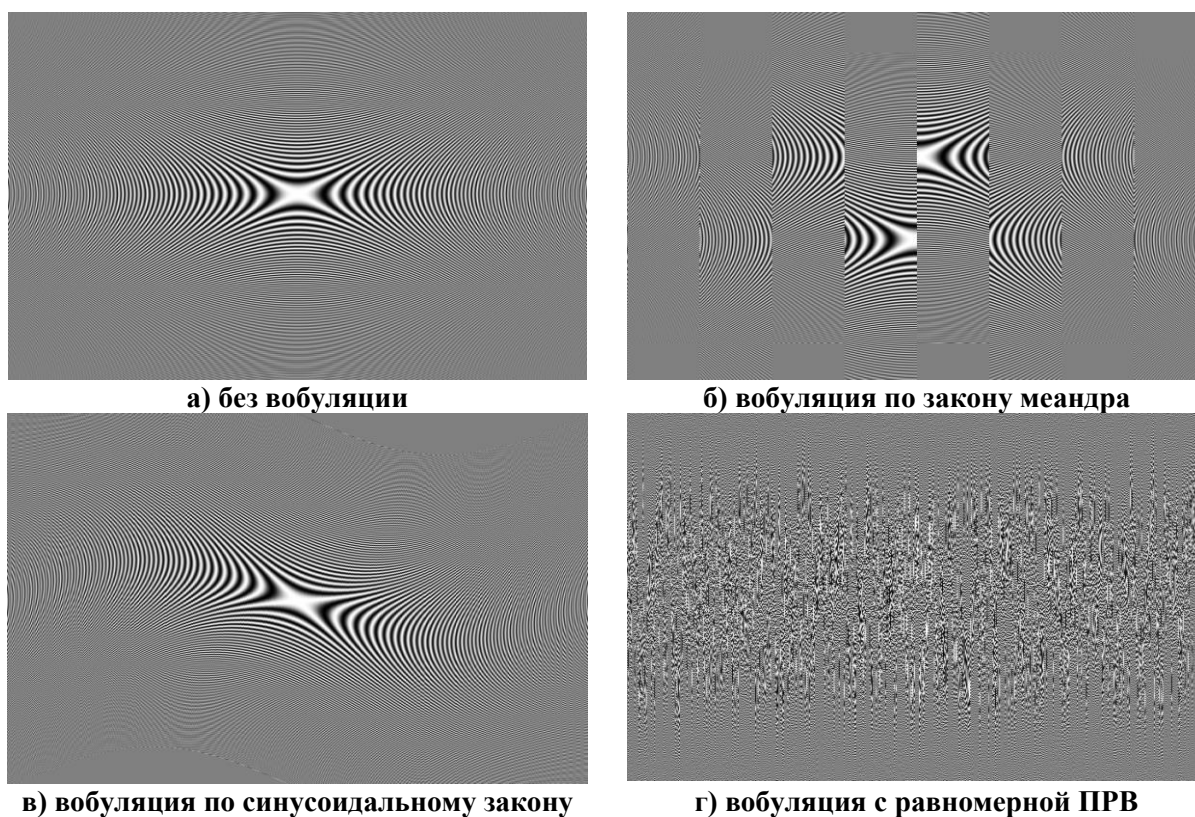


Рис. 7. Голограммы при использовании для зондирования ЛЧМ сигнала

Дадим количественную оценку степени подавления помех, для чего к модели точечной цели в основной зоне съемки (под цифрой 1) добавим помеху в виде эхо-

сигнала от точечной цели из 1-ой зоны неоднозначности (под цифрой 2). Модель помехи имеет такой же уровень, как модель цели в основной зоне, однако немного смещена относительно нее по дальности и азимуту. С целью упрощения моделирования и отделения эффекта применения вобуляции от влияния многочисленных побочных факторов, в модели помехи не учитываются модуляция сигнала по уровню диаграммой направленности и миграции по каналам дальности. Результаты синтеза РЛИ при различных законах вобуляции межимпульсного интервала представлены на рис. 8–12.

РЛИ, полученное в условиях отсутствия вобуляции ($T_n = \text{const}$) и представленное на рис. 8, показывает, что отклик от цели из зоны неоднозначности нормально сжат по дальности, но растянут (расфокусирован) вдоль азимутальной координаты.

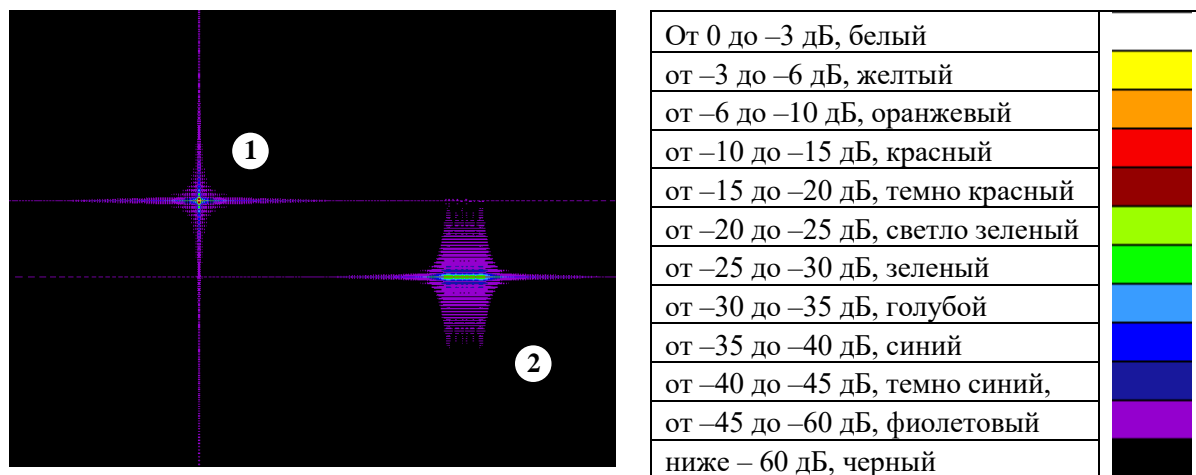


Рис. 8. РЛИ без использования вобуляции

Это обусловлено тем, что азимутальная весовая функция рассчитывается на наклонную дальность до 1-ой цели и для второй цели обработка становится несогласованной. При одинаковой мощности сигналов расфокусировка приводит в рассматриваемых условиях к снижению уровня сигнала на 12 дБ.

Вобуляция прямоугольными импульсами в соответствии с меандровым законом обеспечивает в РЛИ (рис. 9) подавление на 13,5 дБ, при этом помеха дала два отклика, каждый из которых похож на отклик этой цели без использования вобуляции (рис. 8). Применение синусоидальной модуляции периода следования зондирующих сигналов привело к рассредоточению помехи по центральной части РЛИ (рис. 10), при этом уровень помехи снизился до минус 26,5 дБ. Дальнейшее рассеивание мощности помехи по изображению достигается при использовании вобуляции периода с равномерной ПРВ (рис. 11). Синтезированное радиолокационное изображение показывает, что основная область помех сосредоточена в полосе дальностей, определяемой девиацией периода следования. Измеренный максимальный уровень помехи составил минус 38,1 дБ, что достаточно для формирования РЛИ высокого качества.

В рассмотренных экспериментах для зондирования использовался один и тот же сигнал с ЛЧМ. Выше отмечалось, что одним из методов снижения помех неоднозначности по дальности является использование ортогональных (квазиортогональных) сигналов, удовлетворяющих условию (4). Для ЛЧМ сигнала квазиортогональность обеспечивается сменой знака скорости изменения частотной модуляции [3, 6]. Фрагмент РЛИ, синтезированного при комбинировании этих двух методов, представлен на рис. 12. Измерение максимального уровня помехи неоднозначности показало, что совместное применение поимпульсной смены знака скорости изменения ЛЧМ и вобуляции дает подавление на 49,6 дБ.

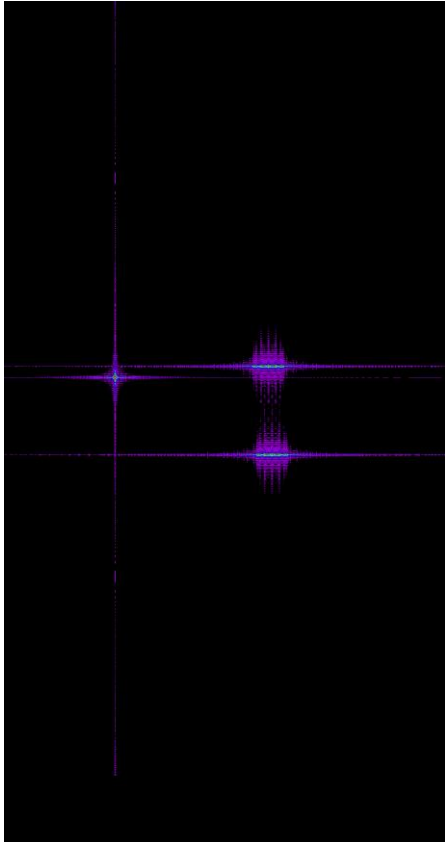


Рис. 9. РЛИ при меандровом законе возбуждения

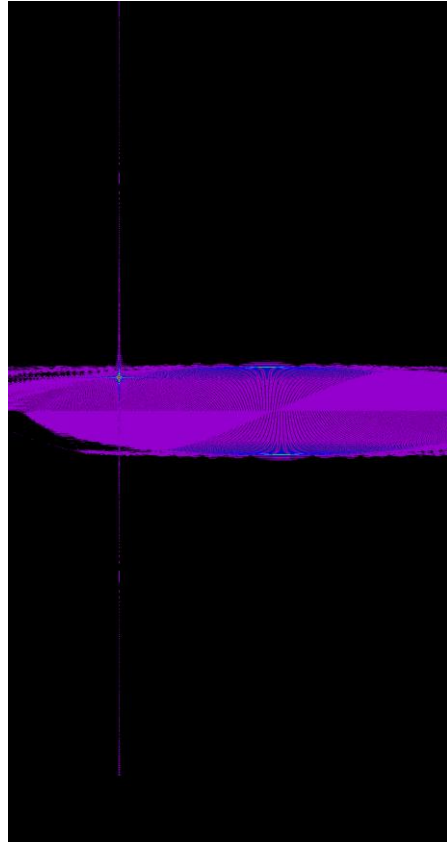


Рис. 10. РЛИ при синусоидальном законе возбуждения

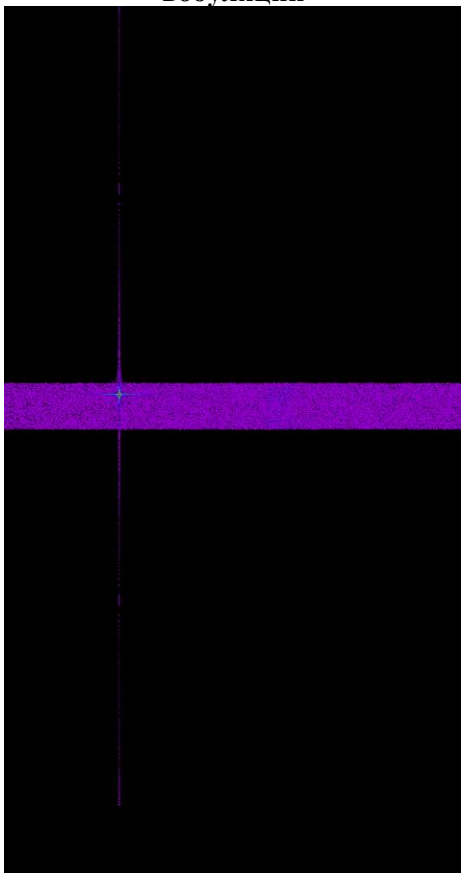


Рис. 11. РЛИ при случайной возбуждении с равномерной ПРВ

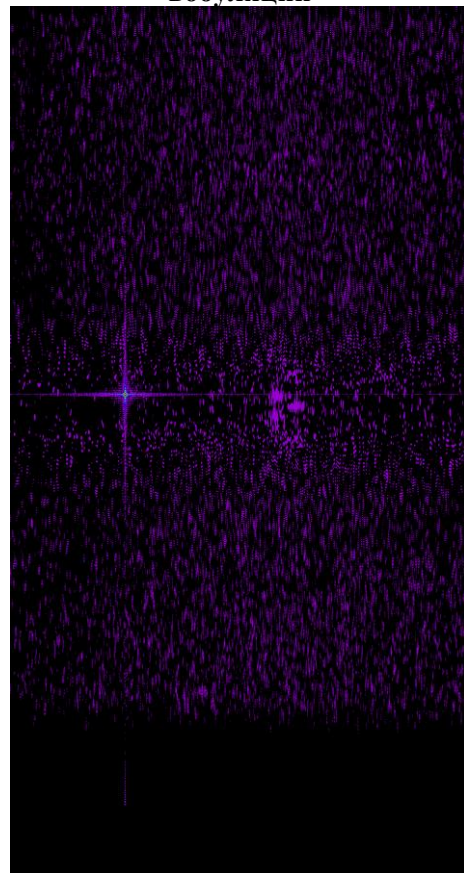


Рис. 12. РЛИ случайной возбуждении и смене знака закона ЛЧМ

Заключение

Результаты моделирования показывают, что метод снижения помех неоднозначности с использованием вобуляции межимпульсного интервала оказался весьма эффективным даже с одинаковым зондирующим сигналом. Уровень подавления неоднозначности от точечной цели зависит, в первую очередь, от закона вобуляции: чем больше импульсов в азимутальной пачке и стохастизма в изменении периода следования, тем больше рассеивается помеха по синтезируемому радиолокационному изображению и, следовательно, меньше уровень помех. Общее подавление при синусоидальной модуляции периода повторения зондирующего сигнала составило 26 дБ, а при использовании равномерной плотности распределения вероятности – 38 дБ.

Дополнительное применение средств борьбы с неоднозначностями по дальности позволяет еще больше снизить уровень помех. Смена знака скорости изменения частотной модуляции снизила уровень неоднозначности на 11 дБ и рассеяла ее по большой площади изображения. После формирования РЛИ помеха неоднозначности по дальности находится на уровне минус 49 дБ, что подтверждает возможность формирования высококачественного РЛИ.

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под общей ред. В.С.Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. Костров В.В., Ракитин А.В. Радиолокационный космический сегмент дистанционного зондирования Земли в 2023 году: состояние и перспективы развития // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. №4. С.11-31.
3. Wen X., Qiu X., Han B., Ding C., Lei B., Chen Q. A Range Ambiguity Suppression Processing Method for Spaceborne SAR with Up and Down Chirp Modulation // Sensors 2018, 18, 1454. Pp.1-15. doi:10.3390/s18051454
4. Карпов О.А., Рабочий А.Н., Толстов Е.Ф., Фёдоров В.С., Костров В.В. Проблемы неоднозначности в космических РСА и коды Голда // Армандовские чтения, Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (27.06–29.06.2023, г. Муром). – Муром: МИ ВлГУ, 2023. С.375-384.
5. Бабокин М.И., Савостьянов В.Ю., Степин В.Г. Частотная и фазовая модуляция ЛЧМ сигналов РСА малых космических аппаратов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. №4. С.32-40. DOI 10.24412/2221-2574-2023-4-32-40
6. Карпов О.А., Костров В.В., Макаров В.П., Ракитин А.В., Толстов Е.Ф. Возможности семейства зондирующих сигналов с частотной модуляцией для снижения неоднозначности по дальности в РСА космического базирования // Армандовские чтения, Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (25.06–27.06.2024, г. Муром) – Муром: МИ ВлГУ, 2024. (см. настоящий сборник)
7. Sosulin Yu.G., Kostrova T.G., Kostrov V.V. Suppression of Second Scan Stroke Echo Signals in Pulsed Surveillance Radar // Proc. German Radar Symp., Bonn, Germany. September 3–5, 2002. Pp.449-453.
8. Herrmann J., Bottero A.G. TerraSAR-X Mission: The New Generation in High Resolution Satellites // Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21–26 abril 2007, INPE. Pp.7063-7070.