

УДК 621.396.96

Построение диаграмм слепых дальностей и надирных отражений радиолокатора с синтезированной апертурой в MATLAB

Булыгин М.Л.^{*}, Внотченко С.Л.^{}**

Научно-исследовательский институт точных приборов,

ул. Декабристов, владение 51, Москва, 127490, Россия

**e-mail: Bulygin04@gmail.com*

***e-mail: vn23@yandex.ru*

Аннотация

В статье предлагается подход к построению диаграммы помех для космических РСА на языке MATLAB. Изложены геометрические соотношения для описания условий бокового визирования из космоса. Рассмотрены основные временные соотношения при излучении и приеме сигналов в РСА. Исследуется влияние рельефа местности и неточности знания высоты орбиты космического аппарата на положение зон слепых дальностей и надирных отражений на диаграмме. Устанавливается аналитическая зависимость номера помеховой зоны и положения ее границ на диаграмме.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, диаграмма помех, слепые зоны, надирные отражения.

Введение

Основными помехами визированию из космоса при радиолокационном синтезировании апертуры (РСА), наряду с помехами неоднозначности, являются

«слепые» дальности и надирные (альтиметровые) отражения. Данные эффекты являются следствием использования периодических зондирующих сигналов в радиолокаторах с одной приемо-передающей антенной [1, 2].

Особенностью космических РСА является работа с относительно малым периодом повторения, при котором первый эхо-сигнал достигает антенны радиолокатора, когда уже излучены десятки зондирующих импульсов. В моменты излучения импульсов приемный тракт блокируется, в результате чего приёмником регистрируется только часть отражений от Земли в паузах между зондирующими импульсами. Потеря части отраженных сигналов называется эффектом «слепых» дальностей (задержек).

Надирная помеха возникает в результате зеркального отражения зондирующего сигнала от области земной поверхности под космическим аппаратом. Хотя антенна РСА всегда ориентирована так, что эта область наблюдается дальними лепестками диаграммы направленности (ДН), существенно ослабляя помеху, тем не менее, надирные помехи могут значительно ухудшить качество радиолокационных изображений [2]. Наиболее заметный эффект имеет место когда надирная точка приходится на гладкую отражающую поверхность, например, водную.

Влияние слепых зон и надирных помех в момент приема эхо-сигнала можно исключить путем корректного выбора периода повторения зондирующих импульсов. Интервалы прихода эхо-сигнала и моменты возникновения помеховых факторов определяются геометрией визирования: наклонными

дальностями, высотой орбиты, рельефом местности. Наглядно интерпретировать помеховую обстановку на интересующем участке местности в зависимости от периода повторения и проанализировать ее изменение при наличии рельефа местности можно путем построения диаграмм помех в осях наклонная дальность – период повторения (вместо наклонной дальности так же может использоваться угол места или горизонтальная дальность) [3, 4].

Примечание – «Слепые» зоны, по природе своего происхождения не являются помехой. Однако на диаграмме они анализируются совместно с надирной помехой, поэтому далее, применительно к диаграмме распределения слепых дальностей и надирных отражений, будет употребляться термин диаграмма помех.

Геометрические соотношения в сферической модели Земли

При описании условий наблюдения поверхности используется модель Земли в виде сферы с радиусом $R_S = 6371,1$ км. Основные геометрические соотношения для данной модели при строго боковом визировании иллюстрируются рисунком 1, где показаны: H – высота орбиты КА над поверхностью сферы (без учета рельефа подспутниковой точки и изменения высоты КА); ΔH – отклонение высоты орбиты КА от номинального значения H ; ε – угол визирования заданной точки наблюдения (с учётом рельефа и изменения высоты космического аппарата (КА)); R – наклонная дальность до заданной точки наблюдения (с учётом рельефа и изменения высоты КА); L – горизонтальная

дальность до заданной точки наблюдения от линии КА–надир до точки съемки, измеряемая по дуге, радиус которой равен расстоянию от центра Земли до точки съемки; $\Delta h_{ПС}$ – высота рельефа полосы съемки; $\Delta h_{КА}$ – высота рельефа подспутниковой точки; η – угол падения; ε' – угол визирования заданной точки при отсутствии рельефа и отклонений высоты КА; R' – наклонная дальность до заданной точки наблюдения при отсутствии рельефа и отклонений высоты КА; L' – горизонтальная дальность до заданной точки наблюдения при отсутствии рельефа и отклонений высоты КА; γ – центральный угол, соответствующий дугам L и L' .

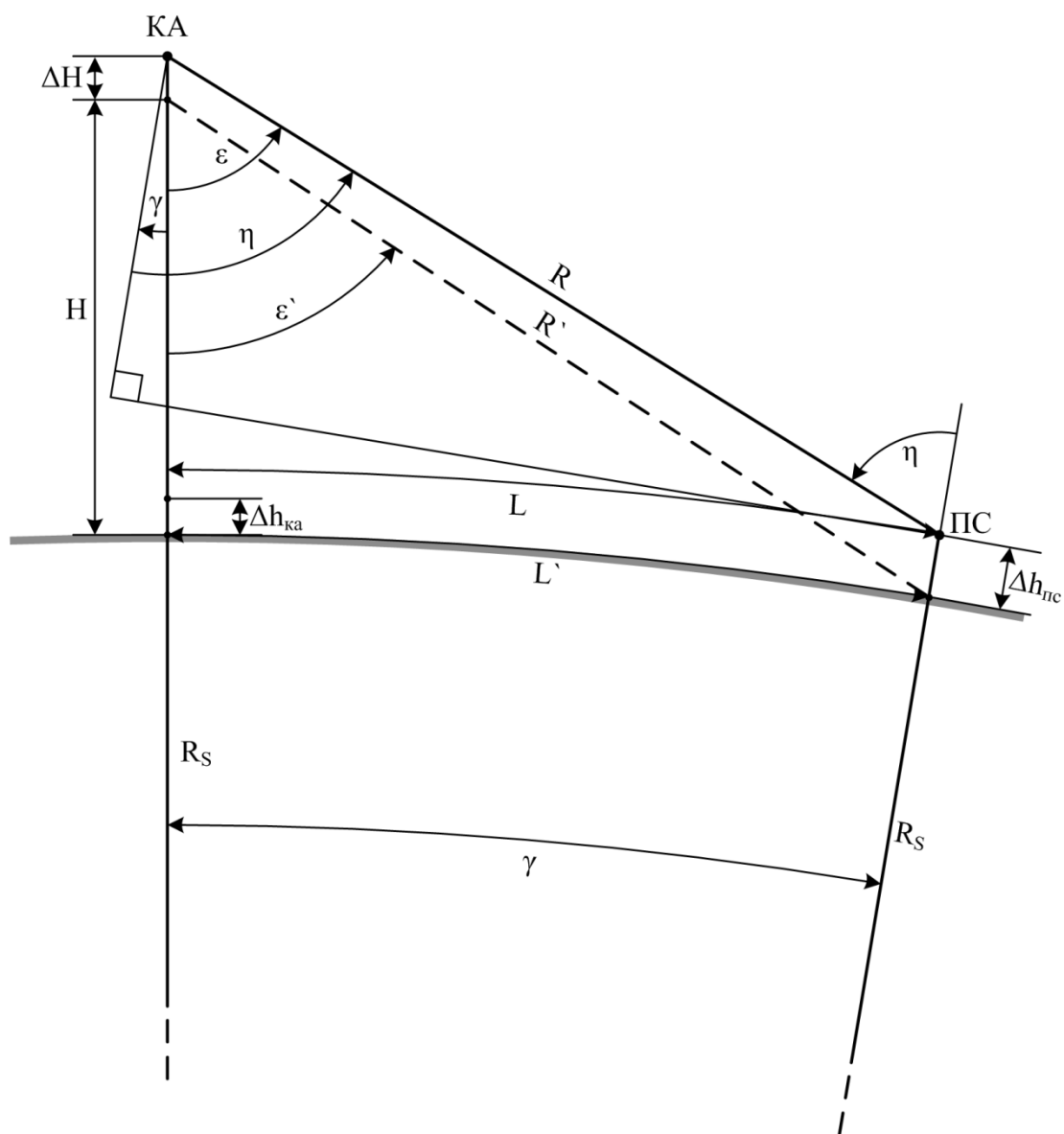


Рисунок 1 – Геометрия бокового визирования в РСА: КА – положение космического аппарата с бортовым радиолокатором, ПС – точка в центре полосы съемки.

Примечание – Использование сферической модели весьма условно, поскольку форма поверхности Земли отлична от сферы и описывается геоидом. Однако на некотором ограниченном участке местности Земная поверхность

может быть аппроксимирована сферой (окружностью при боковом визировании) при этом необходимо уточнять значение среднего локального радиуса Земли R_S .

В сферической модели Земли для расчёта геометрических зависимостей с учетом рельефа используются следующие соотношения между основными параметрами:

$$\gamma = \frac{L}{R_S + \Delta h_{ПС}} = \frac{L'}{R_S}, \quad (1)$$

коэффициент сферичности с учетом рельефа и изменений высоты КА:

$$K_S = \frac{R_S + H + \Delta H}{R_S + \Delta h_{ПС}}, \quad (2)$$

длина дуги:

$$L(\varepsilon) = (R_S + \Delta h_{ПС}) \cdot (\eta - \varepsilon) = (R_S + \Delta h_{ПС}) \cdot (\arcsin(K_S \cdot \sin(\varepsilon)) - \varepsilon). \quad (3)$$

Центр Земли, точки КА и ПС образуют треугольник. Из теоремы косинусов [3]:

$$R(\gamma) = (R_S + \Delta h_{ПС}) \cdot \sqrt{K_S^2 + 1 - 2 \cdot K_S \cdot \cos(\gamma)}, \quad (4)$$

$$R(\varepsilon) = (R_S + \Delta h_{ПС}) \cdot \left(K_S \cdot \cos(\varepsilon) - \sqrt{1 - K_S^2 \cdot \sin^2(\varepsilon)} \right), \quad (5)$$

$$\varepsilon(R) = \arcsin \left(\frac{(K_S^2 - 1) \cdot (R_S + \Delta h_{ПС})^2 + R^2}{2 \cdot R \cdot K_S \cdot (R_S + \Delta h_{ПС})} \right) \quad (6)$$

При наличии рельефа местности и/или изменений высоты орбиты КА (по сравнению с визированием без рельефа и отклонений высоты) значения горизонтальной и наклонной дальности, а так же угла места изменятся, соответственно, с L' , R' , ε' на L , R , ε . Переход от исходных геометрических параметров визирования к новым осуществляется по следующим соотношениям:

$$L(L', \Delta h_{ПС}) = L' \cdot \frac{R_s + \Delta h_{ПС}}{R_s}, \quad (7)$$

$$R(\varepsilon', \Delta H, \Delta h_{ПС}) = (R_s + \Delta h_{ПС}) \cdot \sqrt{K_s^2 + 1 - 2 \cdot K_s \cdot \cos\left(\arcsin\left(\sin(\varepsilon') \cdot \left(1 + \frac{H}{R_s}\right)\right) - \varepsilon'\right)} \quad (8)$$

$$\varepsilon(\varepsilon', \Delta H, \Delta h_{ПС}) = \arcsin\left(\frac{\sin\left(\arcsin\left(\sin(\varepsilon') \cdot \left(1 + \frac{H}{R_s}\right)\right) - \varepsilon'\right)}{\sqrt{K_s^2 + 1 - 2 \cdot K_s \cdot \cos\left(\arcsin\left(\sin(\varepsilon') \cdot \left(1 + \frac{H}{R_s}\right)\right) - \varepsilon'\right)}}\right) \quad (9)$$

Примечание – При вычислении R и ε по соотношениям 8-9 необходимо пересчитывать значение параметра K_s (2), который зависит от ΔH и $\Delta h_{ПС}$.

Временные соотношения сигналов

Диаграмма распределения помех на плоскости наклонная дальность – период повторения строится в заданном угловом диапазоне $\varepsilon_{min} \dots \varepsilon_{max}$ (где данные граничные углы визирования пересчитываются в наклонную дальность $R_{min} \dots R_{max}$) с дискретом ΔR и на интервале периодов повторения $T_{Пmin} \dots T_{Пmax}$ с шагом $\Delta T_{П}$. При построении используется следующий итерационный принцип: для каждой точки $(R, T_{П})$ плоскости наклонная дальность – период повторения рассчитывается положение зондирующего импульса, надирной помехи и эхо-сигнала на оси времени. Затем проверяется, не попадает ли какая-либо из двух помех в эхо-сигнал, после чего

выносится решение о наличии или отсутствии в точке (R, T_{II}) того или иного типа помех.

Поскольку представленный подход требует работы с векторами и массивами данных, а конечным результатом является визуализация диаграммы, то наиболее удобным инструментом для решения данной задачи является программный пакет MATLAB, встроенные функции которого и механизм отображения результатов позволяют относительно легко справиться с расчётом и построением диаграмм.

Рассмотрим основные зависимости для построения диаграммы распределения помех. На рисунке 2 представлены огибающие всех исследуемых сигналов РСА на оси времени: красным обозначены зондирующие импульсы, синим – надирные отражения, зеленым – эхо-импульсы.

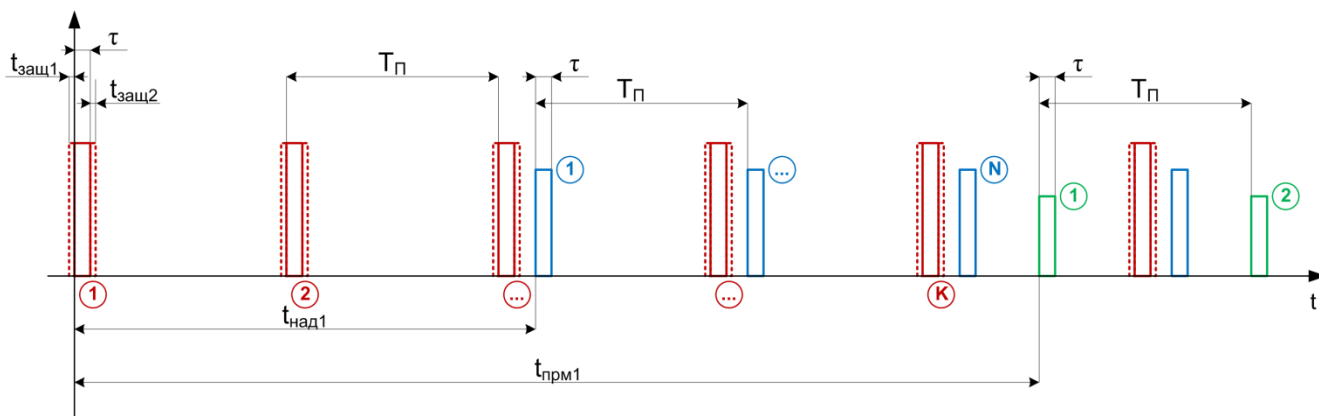


Рисунок 2 – Диаграмма сигналов в РСА.

Зондирующие импульсы излучаются с периодом повторения T_{II} . Момент времени начала излучения первого зондирующего импульса соответствует $t = -$

$t_{защ1}$, момент окончания наступает при $t = \tau + t_{защ2}$, где $t_{защ1}$ и $t_{защ2}$ – технологические защитные интервалы, затрачиваемые бортовой аппаратурой на коммутацию приема-передающих трактов с антенной до и после излучения зондирующего сигнала длительностью τ . Данные интервалы включены в длительность зондирующего импульса (в протяженность слепой зоны) поскольку в момент коммутации приема-передающих каналов с антенной тракт приема не регистрирует эхо-сигнал из-за отсутствия связи с антенной.

Момент прихода первой надирной помехи $t_{над1}$, вызванной первым зондирующим импульсом, может быть определен из следующего соотношения:

$$t_{над1} = 2 \cdot \frac{H + \Delta H_{КА} - \Delta h_{КА}}{c}, \quad (10)$$

момент окончания первой надирной помехи $t_{над2}$ вычисляется как:

$$t_{над2} = t_{над1} + \tau. \quad (11)$$

Момент прихода первого эхо-сигнала от рассматриваемой точки на поверхности Земли $t_{нрм1}$ определяется наклонной дальностью до точки визирования R :

$$t_{нрм1} = 2 \cdot \frac{R}{c}, \quad (12)$$

момент окончания первого эхо-сигнала от рассматриваемой точки на поверхности Земли:

$$t_{нрм2} = t_{нрм1} + \tau. \quad (13)$$

Длительность эхо-сигнала соответствует длительности зондирующего сигнала, так как при построении диаграммы анализируется точечная цель, а не

совокупность точек на поверхности Земли, охватываемая лучом ДН по углу места [2, 5].

Поскольку на рассматриваемом интервале времени параметры визирования и параметры зондирующего сигнала не изменяются, то от периода к периоду положение надирных отражений и эхо-сигналов, относительно зондирующих импульсов, на временной оси будет неизменным. Это позволяет проанализировать картину помех всего в одном периоде приема эхо-сигнала.

Анализ слепых зон производится в K -ом периоде излучения зондирующих импульсов, в котором наступает момент времени $t_{нрм1}$ (рисунок 3). Для этого рассчитывается время прихода эхо-сигнала в K -ом периоде излучения:

$$t_{нрм1}' = t_{нрм1} - T_{\Pi} \cdot \text{floor} \left[\frac{t_{нрм1}}{T_{\Pi}} \right], \quad (14)$$

где floor – операция округления до ближайшего целого в меньшую сторону. В языке MATLAB операция вычисления остатка от деления (в соответствии с соотношением 14) выполняется при помощи функции rem [6].

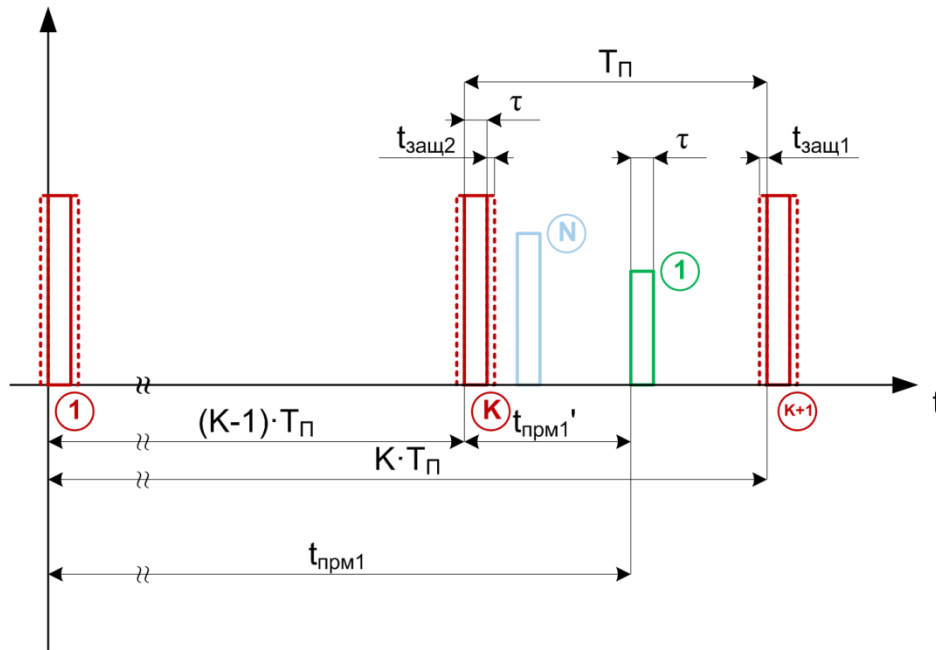


Рисунок 3 – Анализ K -ого периода излучения.

Эхо-импульс не будет перекрываться слепыми зонами, связанными с излучением зондирующего импульса, тогда и только тогда, когда эхо-импульс находится между двумя импульсами зондирующего сигнала. Для анализа наличия слепых зон в эхо-сигнале сформулируем следующее правило:

- если $[(\tau + t_{защ2}) < t_{прм1}']$ и $[(t_{прм1}' + \tau) < (T_{П} - t_{защ1})]$ – помех нет;
- в противном случае – есть слепая зона.

Анализ надирных отражений ведется в N -ом периоде прихода надирного отражения (которому соответствует момент прихода эхо-сигнала $t_{прм1}$). Для этого рассчитывается время прихода эхо-сигнала в N -ом периоде прихода надирного отражения (рисунок 4):

$$t_{прм2}'' = (t_{прм1} - t_{над1}) - T_{П} \cdot \text{floor} \left[\frac{t_{прм1} - t_{над1}}{T_{П}} \right], \quad (15)$$

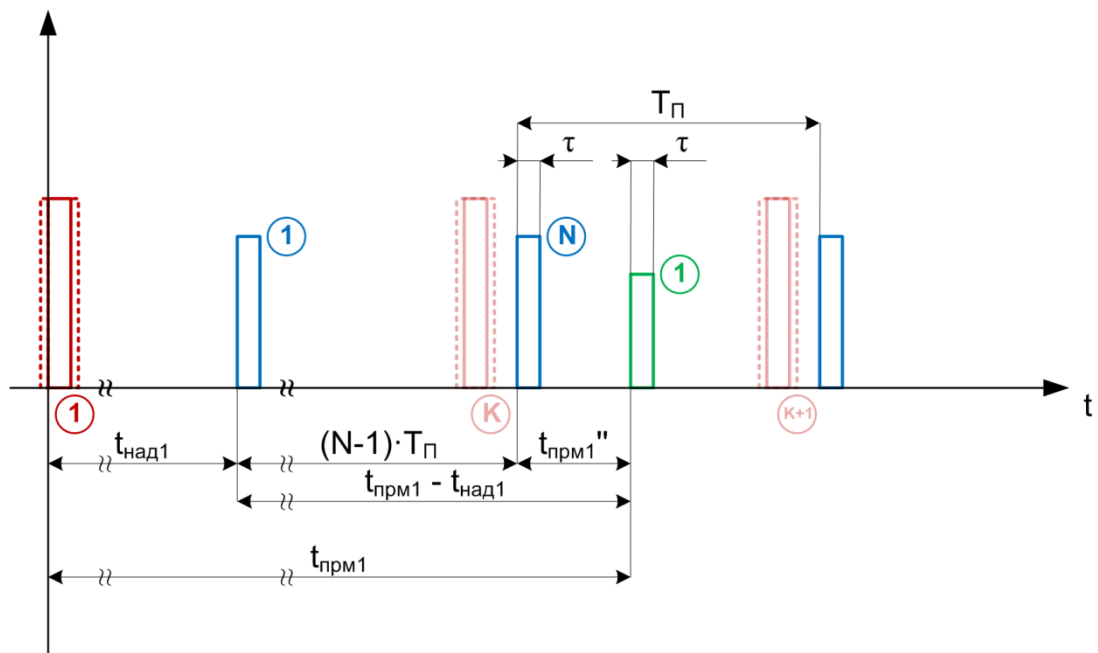


Рисунок 4 – Анализ надирных отражений в N -ом периоде прихода надирных отражений.

Эхо-импульс не будет содержать помех, связанных с приходом отражений от Земли, тогда и только тогда, когда он находится между двумя моментами прихода отражений от Земли. Для анализа наличия надирных отражений в эхо-сигнале сформулируем следующее правило:

- если $[\tau < t_{прм1}'']$ и $[(t_{прм1}'' + \tau) < T_{п}]$ – помех нет;
- в противном случае – есть надирные отражения.

Исследуя каждую точку $(R, T_{п})$ на плоскости наклонная дальность – период повторения, в соответствии с описанными правилами, можно вынести решение о наличии в ней той или иной помехи. В модели MATLAB, реализующей данный алгоритм, заложен следующий принцип формирования диаграммы помех:

- если по результатам анализа слепых зон (СЗ) в точке (R, T_{II}) выносится решение о наличии данного вида помех, то массиву $F_{cз}(R, T_{II})$ присваивается значение 2. В противном случае – 0.

- если по результатам анализа надирных отражений (НО) в точке (R, T_{II}) выносится решение о наличии данного вида помех, то массиву $F_{но}(R, T_{II})$ присваивается значение 1, в противном случае – 0.

После окончания перебора всех точек в пределах интересующего диапазона наклонных дальностей и периодов повторения, вычисляется массив F , который представляет собой поэлементную сумму матриц:

$$F(R, T_{II}) = F_{cз}(R, T_{II}) + F_{но}(R, T_{II}), \quad (16)$$

В таблице 1 представлены все возможные значения функции F .

Таблица 1 – Значения функции F

Значение массива $F_{cз}$ в точке (R, T_{II})	Значение массива $F_{но}$ в точке (R, T_{II})	Значение массива $F = F_{cз} + F_{но}$ в точке (R, T_{II})	Цвет точки (R, T_{II}) на диаграмме	Примечание
0	0	0	Белый	Помех нет
0	1	1	Голубой	Есть НО
2	0	2	Красный	Есть СЗ
2	1	3	Серый	Есть СЗ и НО

На рисунке 5 представлен пример диаграммы помех рассчитанной для радиолокатора TerraSAR-X, характеристики которого представлены в таблице 2 [1].

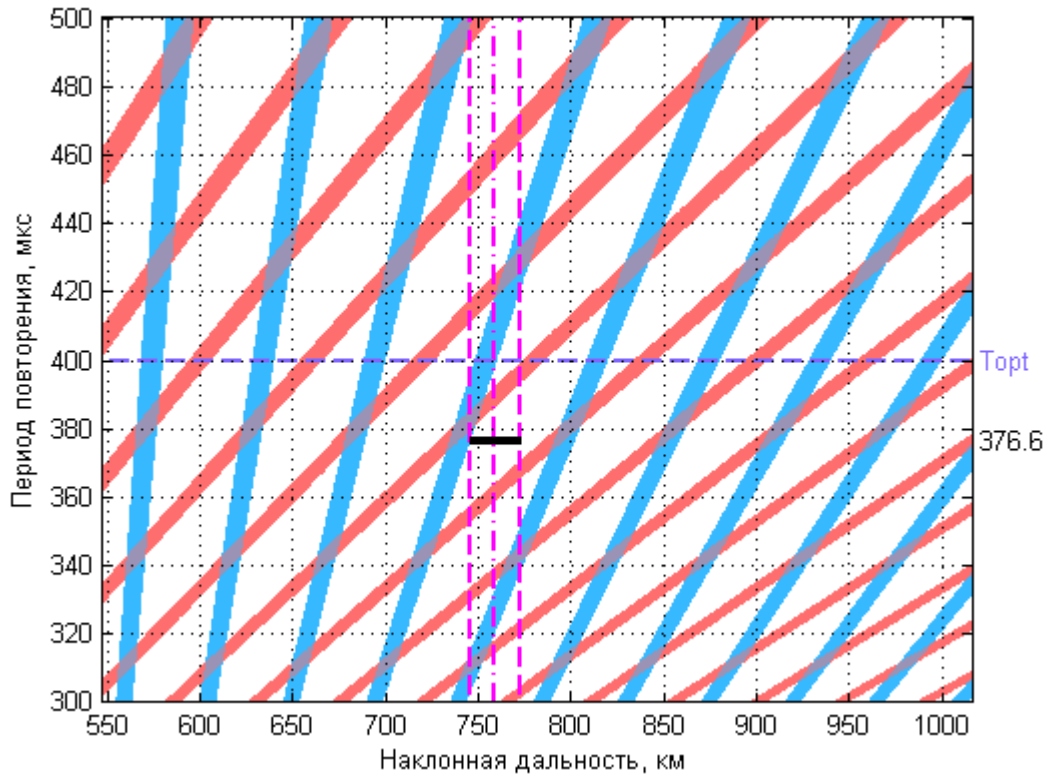


Рисунок 5 – Диаграмма помех радиолокатора TerraSAR-X в угловом диапазоне 20...55 градусов при скважности сигнала 10.

Таблица 2 – Исходные данные для построения диаграммы на рисунке 5.

Параметр	Обозначение	Значение
Высота КА	H	514 км
Диапазон углов места	$\varepsilon_{min} \dots \varepsilon_{min}$	20°...55°
Диапазон наклонных дальностей	$R_{min} \dots R_{max}$	550...985 км
Шаг по наклонной дальности	ΔR	0,1 км
Диапазон периодов повторения	$T_{\Pi min} \dots T_{\Pi max}$	300...500 мкс
Шаг по периоду повторения	ΔT_{Π}	0,1 мкс
Ширина ДН по углу места (2-сторон.)	$\Delta \varepsilon$	1,75°
Скважность сигнала	Q	10
Отклонение высоты КА	$\Delta H_{КА}$	0 м
Рельеф местности под КА	$\Delta h_{КА}$	0 м
Рельеф местности полосы съемки	$\Delta h_{ПС}$	0 м
Угол места полосы съемки	ε	45°
Оптимальный период повторения	$T_{\Pi opt}$	400 мкс

Примечание – В данном примере в качестве $T_{\Pi opt}$ выбрано среднее значение из диапазона $T_{\Pi min} \dots T_{\Pi max}$.

Фиолетовыми линиями на диаграмме отмечены границы снимаемого участка местности (пунктир) и центр снимаемой полосы (штрих-пунктир) который соответствует направлению визирования максимумом ДН. Для быстрой визуализации двумерных массивов на плоскости в MATLAB используется функция `imagesc`.

По диаграмме для снимаемого участка местности может быть выбрано значение рабочего периода повторения (чёрная линия). Для этого в пределах полосы съемки на диаграмме выбирается такое значение T_{Π} при котором в пределах полосы съемки отсутствуют слепые зоны и надирные помехи, и которое расположено наиболее близко к $T_{\Pi opt}$ (синий пунктир). В представленном на рисунке 5 примере, $T_{\Pi раб} = 376,6$ мкс.

Аналитический подход к построению диаграммы помех

Положение помех на диаграмме зависит от наклонной дальности до соответствующего участка местности, а так же от расстояния до подспутниковой точки. Изменение этих параметров, из-за изменения высоты рельефа местности и высоты орбиты, приводит к смещению помех на диаграмме, что, в свою очередь, влияет на выбор значения рабочего периода повторения.

Согласно соотношению (7) время появления надирной помехи $t_{над1}$ определяется расстоянием от КА до подспутниковой точки (что то же самое – наклонной дальностью до подспутниковой точки). Таким образом, положение помех на диаграмме определяется изменением высоты орбиты ΔH и высотой рельефа подспутниковой точки $\Delta h_{КА}$.

На рисунке 6 представлена диаграмма помех, построенная в диапазоне наклонных дальностей 0...700 км и периодов повторения 0...350 мкс. Надирные помехи на диаграмме начинаются в точке B с координатой $(H+\Delta H-\Delta h_{КА}; 0)$, что соответствует (514 км, 0 мкс). Увеличение расстояния от КА до подспутниковой точки (из-за увеличения ΔH или уменьшения $\Delta h_{КА}$) приводит к смещению всех надирных помех на диаграмме вправо на величину $\Delta H-\Delta h_{КА}$. Аналогично: при уменьшении расстояния от КА до подспутниковой точки, надирные отражения на диаграмме будут смещаться влево.

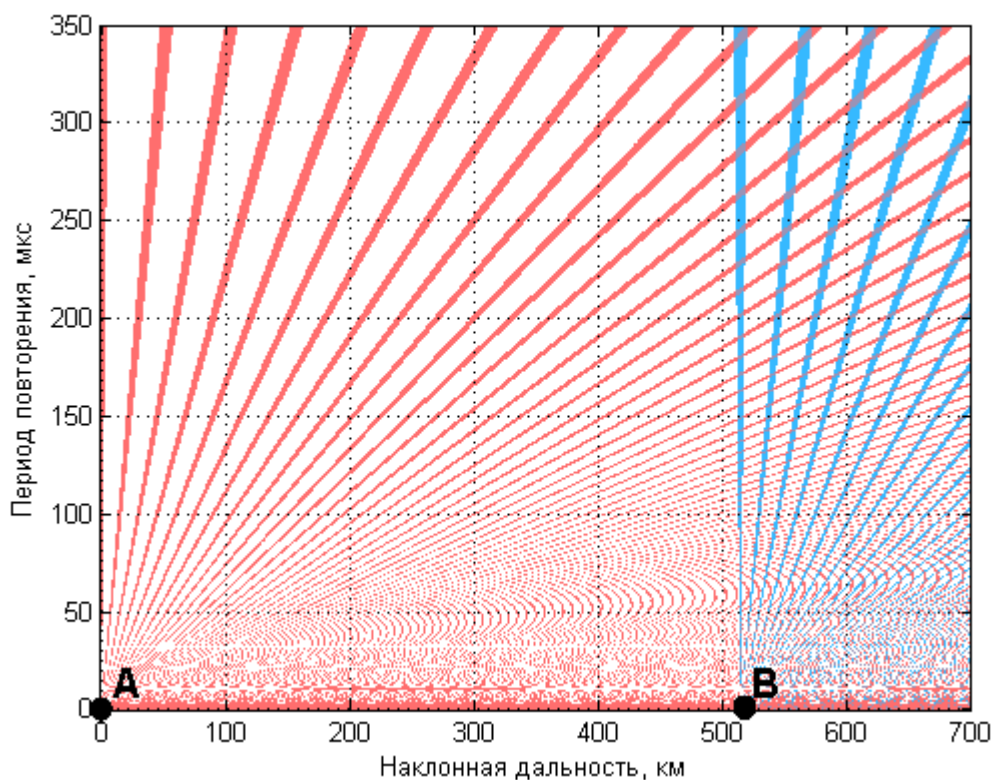


Рисунок 6 – Диаграмма помех в диапазоне 0...700 км, 0...350 мкс.

Точка *A* – начало слепых зон, точка *B* – начало надирных отражений.

Положение зон слепых дальностей на диаграмме определяется только скважностью сигнала Q . Наличие рельефа $\Delta h_{ПС}$ в точке съемки и изменение высоты КА ΔH ведет к изменению наклонной дальности до точки съемки, то есть к изменению положения полосы съемки на диаграмме. Величина смещения полосы съемки на диаграмме может быть вычислена из соотношений (8) и (9).

Таким образом, положение помех на диаграмме относительно полосы съемки и их смещение из-за наличия рельефа может быть оценено аналитически.

Время распространения сигнала до цели и обратно и наклонная дальность до цели связаны между собой линейно, а работа с постоянной скважностью Q

позволяет сделать вывод о том, что границы всех помеховых областей на диаграмме могут быть описаны линейными зависимостями вида $R(T_{II})$ (рисунок 7).

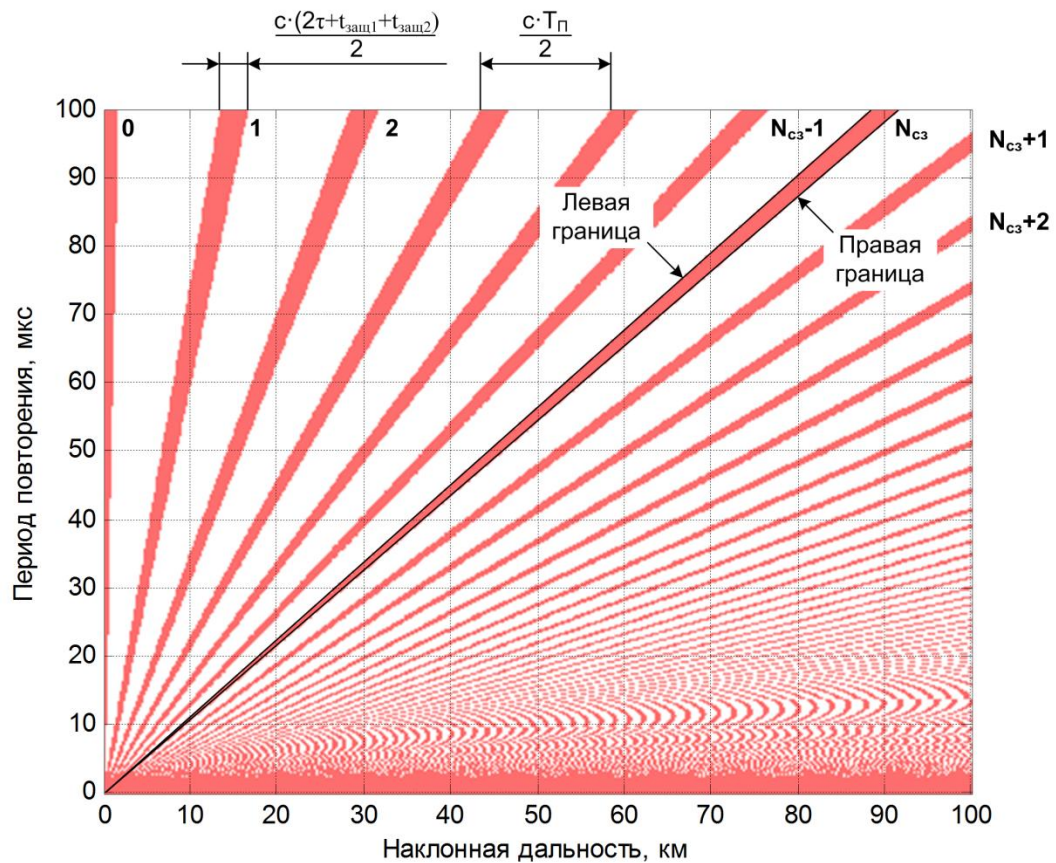


Рисунок 7 – Нумерация и определение границ слепых зон на диаграмме.

Границы каждой слепой зоны (рисунок 6) начинаются в точке A с координатами $(0; 0)$, при некотором произвольном T_{II} левая граница слепой зоны будет иметь координату

$$\left(T_{II}, c \cdot \frac{T_{II} \cdot N_{сз}}{2} - \frac{\tau + t_{защ1}}{2} \right),$$

а правая граница координату

$$\left(T_{II}, c \cdot \frac{T_{II} \cdot N_{CЗ}}{2} + \frac{\tau + t_{защ1}}{2} \right),$$

где $N_{CЗ}$ – номер слепой зоны. Тогда уравнения границ слепых зон запишутся следующим образом:

- левая граница

$$R_{Л}(T_{II}) = \frac{c}{2} \left(T_{II} \cdot N_{CЗ} - \frac{T_{II}}{Q} - t_{защ1} \right), \quad (17)$$

- правая граница

$$R_{П}(T_{II}) = \frac{c}{2} \left(T_{II} \cdot N_{CЗ} + \frac{T_{II}}{Q} + t_{защ2} \right), \quad (18)$$

Границы каждой надирной помехи (рисунок 6) начинаются в B точке с координатами $(H + \Delta H - \Delta h_{КА}; 0)$, форма надирных помех повторяет форму слепых зон (при этом начало надирных помех сдвинуто на диаграмме вправо на величину $H + \Delta H - \Delta h_{КА}$, каждая помеха отличается по ширине от соответствующей слепой зоны из-за учета в слепых зонах технологических защитных интервалов).

Уравнения границ надирных отражений запишутся следующим образом:

- левая граница

$$R_{Л}(T_{II}) = \frac{c}{2} \left(T_{II} \cdot N_{но} - \frac{T_{II}}{Q} \right) + H + \Delta H - \Delta h_{КА}, \quad (19)$$

- правая граница

$$R_{П}(T_{II}) = \frac{c}{2} \left(T_{II} \cdot N_{но} + \frac{T_{II}}{Q} \right) + H + \Delta H - \Delta h_{КА}, \quad (20)$$

Таким образом, изложенный подход к вычислению границ помех на диаграмме позволяет выполнить ее расчет с меньшими затратами по времени и вычислительным мощностям. На рисунке 9 представлен фрагмент диаграммы помех, построенный по исходным данным, соответствующим таблице 2. Расчет производился с использованием аналитического подхода к построению диаграмм в MathCAD.

Из-за особенностей построения графиков в MathCAD на рисунке 9 представлены только по 4 зоны слепых дальностей и надирных отражений. Границы зон на рисунке 9 полностью повторяют границы помеховых зон на рисунке 5, что говорит о корректности работы аналитического подхода к построению диаграмм помех РСА.

Полученные аналитические зависимости позволяют определить положение помеховых зон на диаграмме, не прибегая к итерационному методу. Это позволяет, например, по известному диапазону номеров помех установить их местонахождение на диаграмме (в ограниченном интервале периодов и наклонных дальностей). Это в свою очередь может облегчить поиск рабочих периодов повторений в РСА при которых соблюдается отсутствие надирных отражений и слепых дальностей в пределах эхо-импульса.

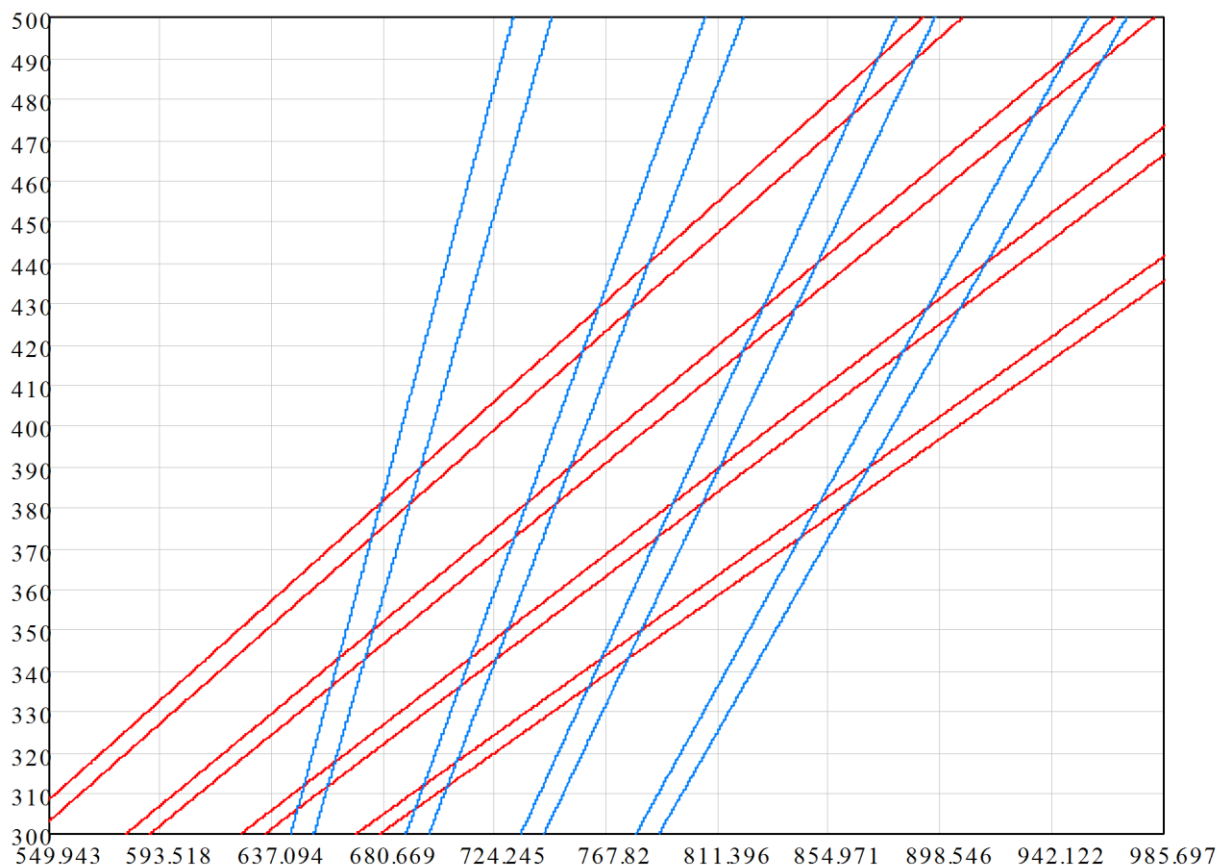


Рисунок 9 – Фрагмент диаграммы помех, рассчитанный аналитически:

красный – границы слепых зон, голубой – границы надирных отражений. По горизонтали – наклонная дальность (км), по вертикали – период повторения (мкс).

Заключение

Реализация итерационного подхода в MATLAB позволяет строить диаграммы помех космических РСА и вычислять рабочий период в зависимости не только от наклонной дальности, но и от угла места и горизонтальной дальности. В виду линейной зависимости наклонных дальностей и периодов повторений для точек, принадлежащих границе одной помеховой зоны, появляется возможность описать данные зависимости линейными уравнениями.

Выведенные соотношения позволяют рассчитать положения границ на диаграмме, не прибегая к итерационному подходу. Это предоставляет возможность к более быстрому анализу помеховой обстановки при заданных условиях визирования в РСА, а так же позволяет использовать соотношения (17)-(20) в алгоритмах расчета рабочих периодов повторения (в том числе и на борту).

Учет в представленных соотношениях рельефа местности позволяет проводить анализ помех в условиях изменения высоты рельефа (в том числе случайного). Например, это может быть актуально при съемке протяжённых маршрутов, когда высота рельефа может меняться в широких пределах, или в условиях, когда параметры визирования задаются с ограниченной точностью.

Библиографический список

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. S. Wollstadt and J. Mittermayer. Nadir Margins in TerraSAR-X Timing Commanding. CEOS SAR Calibration and Validation Workshop, 2008 <http://elib.dlr.de/56524/>.
3. Orion Sky Lawlor. Synthetic Aperture Radar (SAR) Equations in the ASF User Tools. Alaska SAR Facility / Department of Computer Science, University of Alaska at Fairbanks <http://lawlor.cs.uaf.edu/~olawlor>

4. Булыгин М.Л., Муллов К.Д. Формирователь зондирующего сигнала для радиолокатора с синтезированной апертурой // Электронный журнал «Труды МАИ» 2015, № 80: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57040> (дата публикации 26.03.2015).
5. William L. Melvin, James A. Scheer. Principles of Modern Radar Vol. II: Advanced Techniques, 2013 by SciTech Publishing, Edison, NJ, 846 p.
6. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.