

1. Моделирование процесса измерения

Важным преимуществом орбитального радиовысотомера по сравнению с другими радиолокаторами является то, что теоретические модели рассеяния хорошо описывают свойства радиолокационного сигнала, отраженного морской поверхностью. В результате алгоритмы обработки получены не с помощью регрессионного анализа, а основаны на аналитических формулах для формы отраженного импульса.

Если, например, говорить об определении скорости ветра по сечению обратного рассеяния для скаттерометра, то алгоритмы были получены благодаря применению регрессионного анализа массива данных, сформированного из контактных измерений скорости и направления ветра (морские буи) и сечения обратного рассеяния, измеренного радиолокатором. Погрешность оценки (не измерения!) скорости ветра по сечению обратного рассеяния обусловлена неоднозначностью связи скорости ветра и сечения обратного рассеяния.

У радиовысотомера при определении с высоты значительного волнения происходит именно процесс измерения, т.к. существует однозначная связь формы переднего фронта отраженного импульса и высоты значительного волнения, которая выражается через известную формулу. В данном точность измерения ограничивается параметрами радиолокатора, в частности, длительностью излучаемого импульса и частотой дискретизации.

При измерении расстояния от радиолокатора до среднего уровня морской поверхности алгоритм также опирается аналитические формулы и модели, например, учитывает особенности распространения электромагнитного излучения в атмосфере и ионосфере, что позволяет обеспечить высокую точность.

Благодаря возможности достоверного теоретического описания рассеяния электромагнитного излучения взволнованной водной поверхностью, численное моделирование является эффективным инструментом для моделирования работы радиовысотомера и отладки алгоритмов обработки. С его помощью можно провести численный эксперимент и рассмотреть по отдельности и в комплексе влияние множества факторов, которые влияют на точность измерений.

1.1. Схема измерения

Преимущество численного моделирования по сравнению с экспериментом состоит в том, что достаточно просто провести сравнение различных схем измерения и оценить их эффективность для решения конкретной задачи. Однако для этого необходимо подробно описать и перевести в числовую форму все важные для моделирования параметры схемы измерения. В результате это позволит провести полноценный «численный» эксперимент. Для описания схемы измерения необходимо задать угол зондирования (падения) θ_0 , высоту орбиты H_0 , скорость и направление движения v_{rad} , и направление зондирования φ_{rad} . На рис.?? показана схема измерения.

Расстояние от радиолокатора до точки отражения на плоскости xy равно R_0 . Для определенности выберем направление движения радиовысотомера вдоль оси x .

Для плоской поверхности формирование отраженного импульса начинается при касании поверхности передним фронтом падающего импульса в точке непосредственно под радиовысотомером. Это кратчайшее расстояние от радиовысотомера до поверхности. На рис.?? показан пример изменения формы рассеивающей площадки и формы отраженного импульса в зависимости от времени.

Для нахождения отраженного импульса необходимо выполнить интегрирование по рассеивающей площадке для сферической волны с учетом длительности зондирующего импульса.

Если говорить о морской поверхности, то перед интегрированием по рассеивающей площадке необходимо выяснить какие участки поверхности будут вносить свой вклад в формирование отраженного импульса. При малых углах падения механизм обратного рассеяния является квазизеркальным и отражение происходит на участках волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Тогда в формировании отраженного сигнала будут участвовать только площадки, ориентированные нормально к излучению. Поэтому для моделирования рассеяния нам необходимо знать не только высоту в выбранной точке, но и уравнение касательной к ней плоскости, другими словами необходимо знать наклоны ζ_x и ζ_y в искомой точке.

Зная координаты радиолокатора (x_0, y_0, z_0) , координаты точки на поверх-

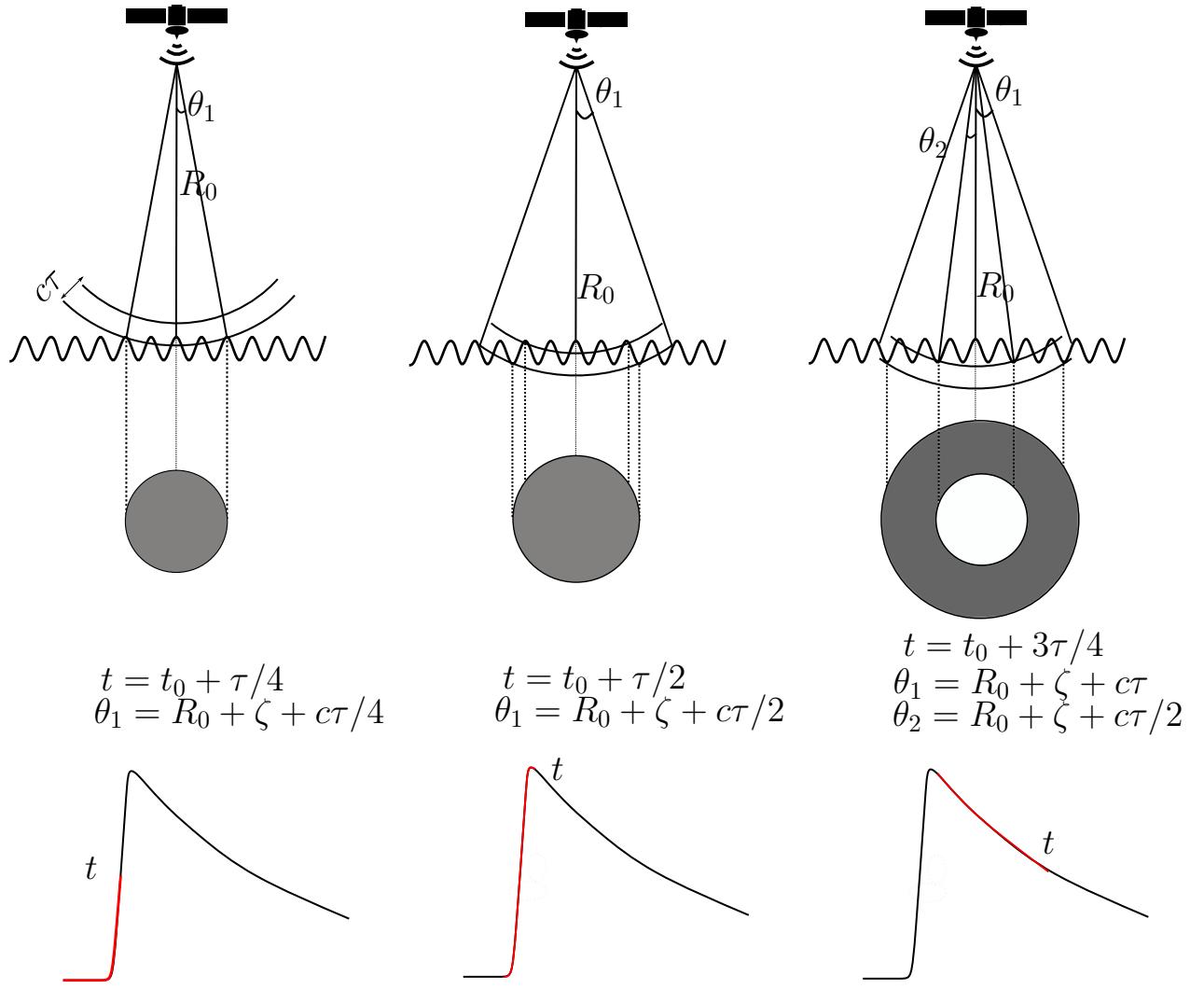


Рис. 1: Геометрическая интерпретация формы отраженного импульса

ности (x, y, z) и наклоны в этой точке $(\zeta_x, \sigma_y, 1)$, можем из геометрии (см. рис. 2) получить локальный угол падения излучения θ_0 :

$$\cos \theta = \frac{\vec{R} \vec{n}}{|\vec{R}| |\vec{n}|}, \text{ где} \quad (1)$$

R – расстояние от радиолокатора до отражающей точки, \vec{n} – нормально касательной плоскости, проведенной к отражающей точке. В случае численного моделирования, когда мы хотим решить задачу нахождения формы отраженного импульса от известной морской поверхности, можем найти \vec{R} как

$$\vec{R} = \vec{R}_0 + \zeta_x \vec{n}_z,$$

Вероятность того, что угол θ_0 будет точно равен нулю и произойдет зеркальное отражение для случайной выбранной точки очень мала, поэтому имеет смысл рассматривать квазизеркальное отражение и вводить ограничение на максимально допустимый локальный угол отражения.

Нахождение всех зеркальных точек на характерном пятне радиолокатора $5 \times 5 \text{ км}^2$ представляет собой ресурсоемкую задачу. Но поскольку формирование импульса носит статистический характер, то мы можем ограничиться лишь выборкой зеркальных точек.

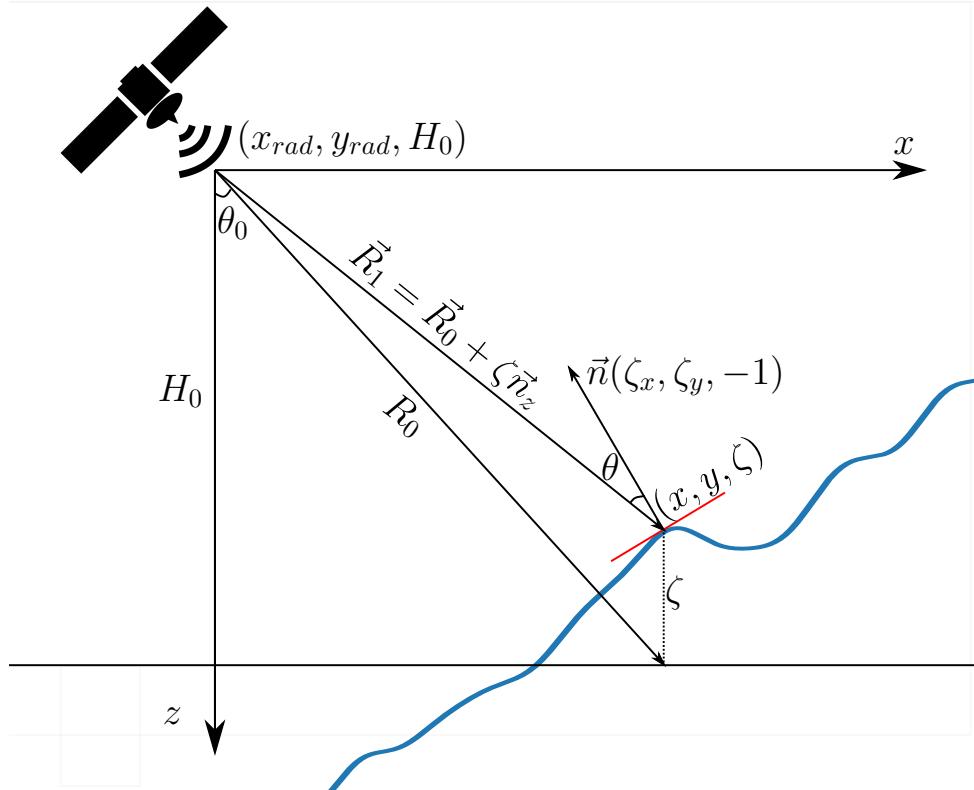
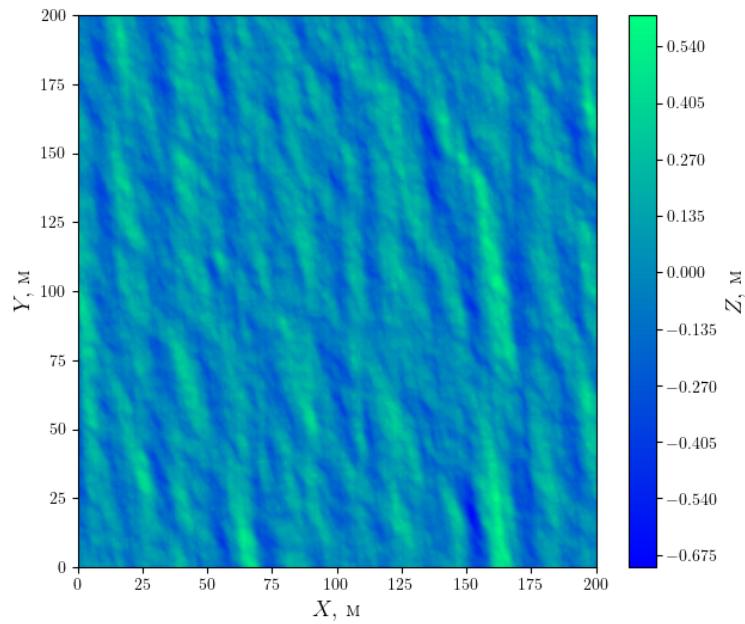


Рис. 2: Геометрия определения локального угла падения. Красной линией обозначена касательная плоскость к рассматриваемой отражающей точке (x, y, ζ)

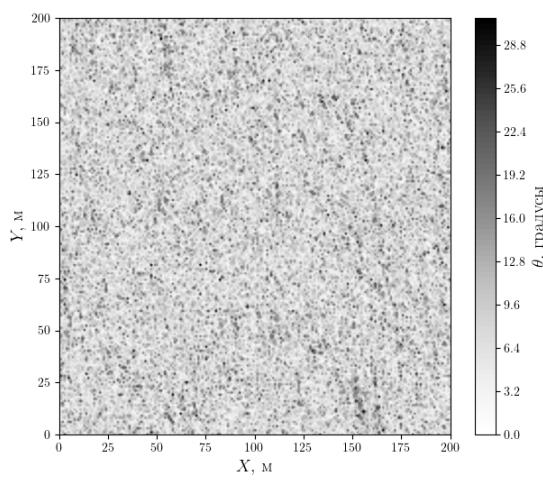
Теперь, для вычисления поля вблизи приемной антенны радиолокатора нам необходимо просуммировать отраженное от квазизеркальных точек поле (см.рис. 3c).

Запишем скалярное поле, излучаемое антенной радиолокатора в зеркальную точку с радиус-вектором \vec{R}

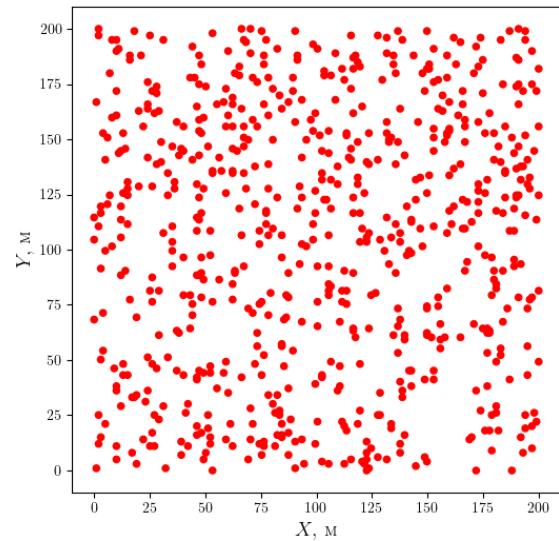
$$E_s(\vec{R}, t) = \frac{E_0}{R} \cdot e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{R})} U(t) G(\theta),$$



(а) Моделирование поверхности при скорости ветра $U = 5$
м/с



(б) Локальный угол отражения от поверхности для радиолокатора находящегося на высоте $H = 1000$ км в точке с координатой $(100, 100)$



(с) Положение зеркальных точек поверхности За для радиолокатора находящегося над точкой $(100,100)$

Рис. 3

где $U(t)$ – некоторая функция, ограничивающая длительность импульса, $G(\theta)$ – диаграмма направленности антенны.

Тогда вблизи приемной антенны амплитуду поля E можно записать как

$$E \sim \frac{E_{sur}}{R_1} e^{-i\vec{k}\vec{R}} \cdot G(\theta) = \frac{E_0}{R^2} e^{-2i\vec{k}\vec{R}} \cdot G^2(\theta), \quad (2)$$

Остается только проинтегрировать уравнение (2) по всем отражающим точкам

$$E \sim \sum_{i=1}^M \frac{E_0}{R_i^2} \exp\{-2ikR_i\} G^2(x, y, \theta_0)$$

где M – количество точек, x_i, y_i – координаты i -ой отражающей точки, R_i – расстояние от спутника до i -ой точки.

Вопрос. Как должно выглядеть «честное» выражение для амплитуды поля? Верно понимаю, что там нужно ещё только дописать УЭПР площадки и умножить на площадь площадки? То есть

$$E = \sum_{i=1}^M \frac{E_0}{R_i^2} \exp\{-2ikR_i\} \sigma_i^o \Delta S_i$$

как правильнее в дальнейшем учесть вес каждой точки? Или здесь мы снова опираемся на статистические свойства формы импульса и считаем, что площадки имеют одинаковый вес? В отчете выдвигало предположение, что они имеют одинаковый вес, но потом нигде не рассматривался случай невыполнения этого предположения

Результирующая мощность импульса будет равна

$$P(t) = \frac{EE^*}{2}$$

Процесс создания такой выборки зеркальных точек продемонстрирован на рис. 3а-3с. Реализация процесса создания выборки и интегрирования по рассеивающим площадкам, входящим в неё представлена в листинге 1. На рис. ?? представлен импульс, посчитанный суммированием по отражающим точкам.

Вопрос. Как получить форму импульса, соответствующую формуле Брауна? На самом деле график на рис. 4б похож

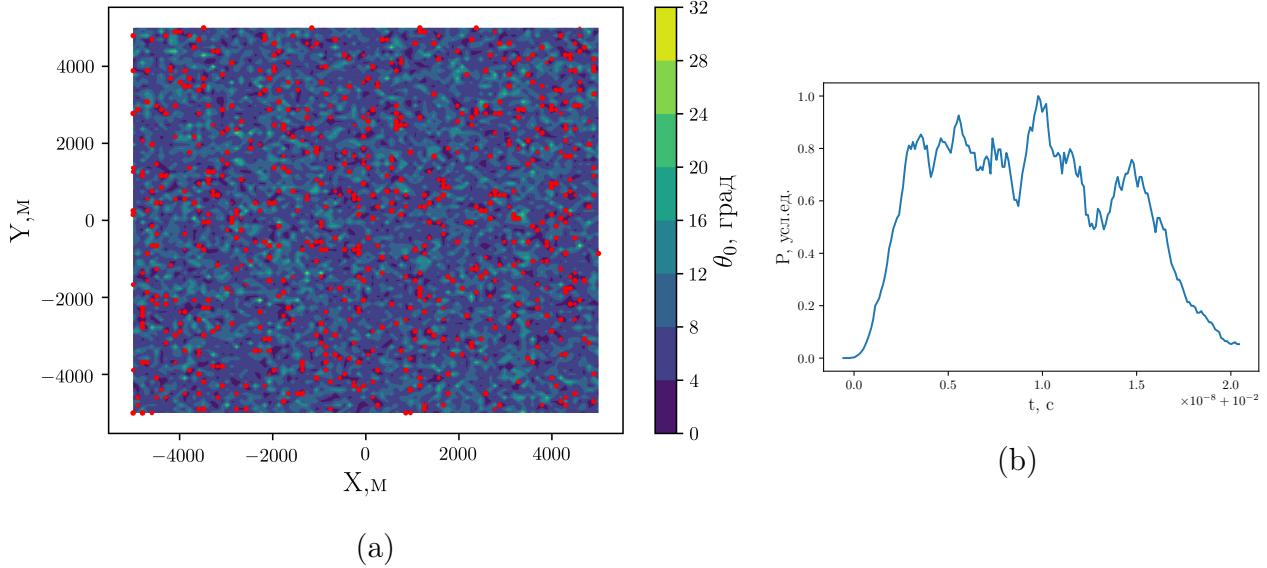


Рис. 4: (а) Вычисление локального угла падения (см.(1)) для радиолокатора, находящегося в точке $(0, 0, h)$. Красным цветом обозначены точки, которые в дальнейшем будут считаться зеркальными и которые будут участвовать в формировании отраженного импульса. (б) Мощность отраженного импульса в зависимости от времени.

на формулу Брауна, но очень сильно зашумленную (просматривается передний фронт, задний тоже можно найти, если иметь хорошее воображение). Насколько я понимаю, для этого мне необходимо производить измерения с помощью не единичного импульса, а их серии (я всё же начинал обрабатывать данные присланные Ростовом и видел, что на реальные радиолокаторы производят порядка сотни импульсов). Должен ли я теперь моделировать несколько импульсов, но с учетом эволюции морской поверхности? Сделал бы это сразу, но такой численный эксперимент требует больших вычислительных затрат, из-за необходимости моделирования сразу нескольких морских поверхностей, поэтому решил спросить у вас и перестраховаться.

Ниже представлены на рис. 5 графики моделирования получения импульса, отраженного от плоской поверхности. Насколько я понимаю, шумы в такой простой задаче вызваны когерентным суммированием гармоник на приемной антенне. А спадание импульса вызвано особенностями моделирования: при распространении сферической волны в плоскости xy она выходит за границы рассматриваемой координатной сетки, тем самым уменьшая количество зеркальных точек, а значит и уменьшая мощность в результате. В этом мож-

но убедиться, если увеличить координатную сетку. Например, на рис. 6 я увеличил немного координатную сетку и задний фронт действительно дольше не спадал. Получается, чтобы избежать таких ошибок, необходимо связывать размер координатной сетки, на которой ищутся зеркальные точки с длительность времени, за которое мы можем моделировать импульс.

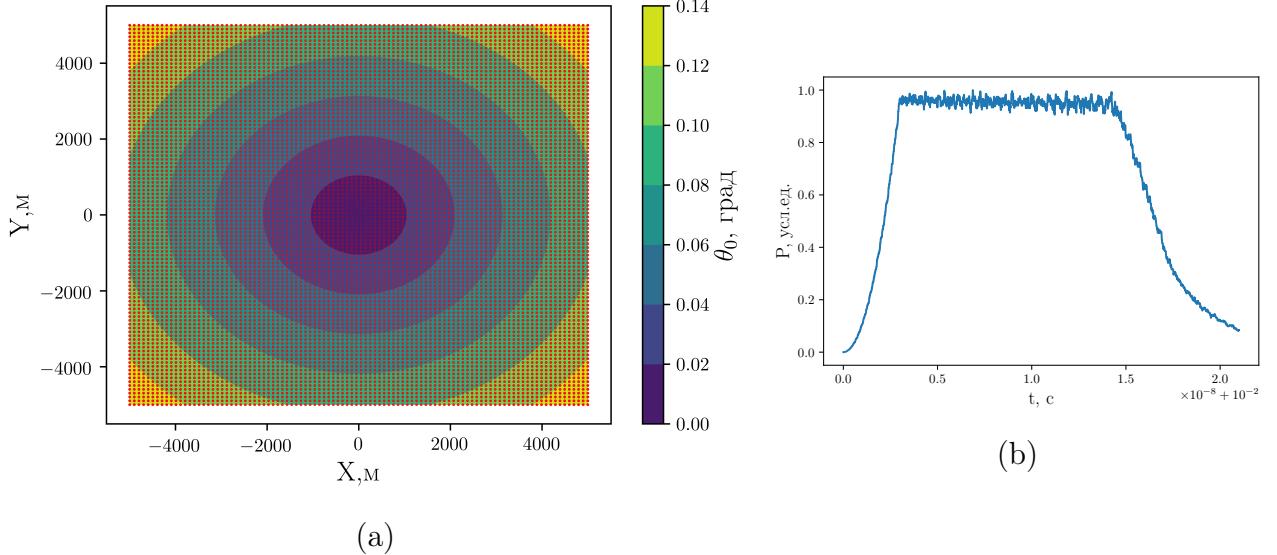


Рис. 5: (а) Вычисление локального угла падения (см.(1)) для радиолокаторе, находящегося в точке $(0, 0, h)$. Красным цветом обозначены точки, которые в дальнейшем будут считаться зеркальными и которые будут участвовать в формировании отраженного импульса. (б) Мощность отраженного импульса в зависимости от времени.

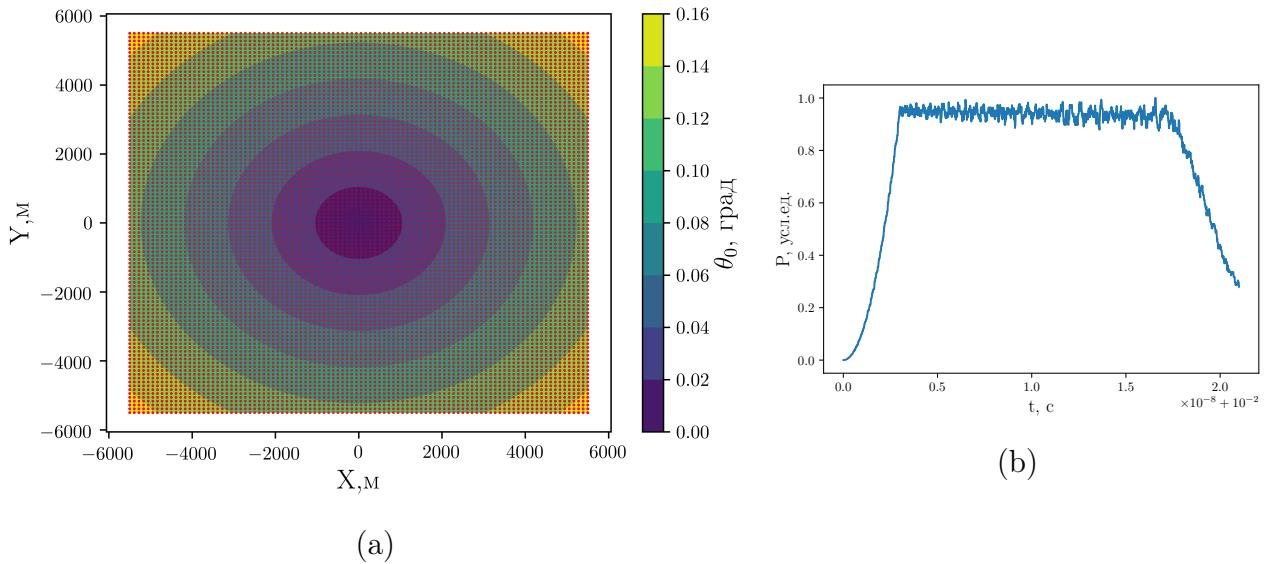


Рис. 6: (а) Вычисление локального угла падения (см.(1)) для радиолокатора, находящегося в точке $(0, 0, h)$. Красным цветом обозначены точки, которые в дальнейшем будут считаться зеркальными и которые будут участвовать в формировании отраженного импульса. (б) Мощность отраженного импульса в зависимости от времени.

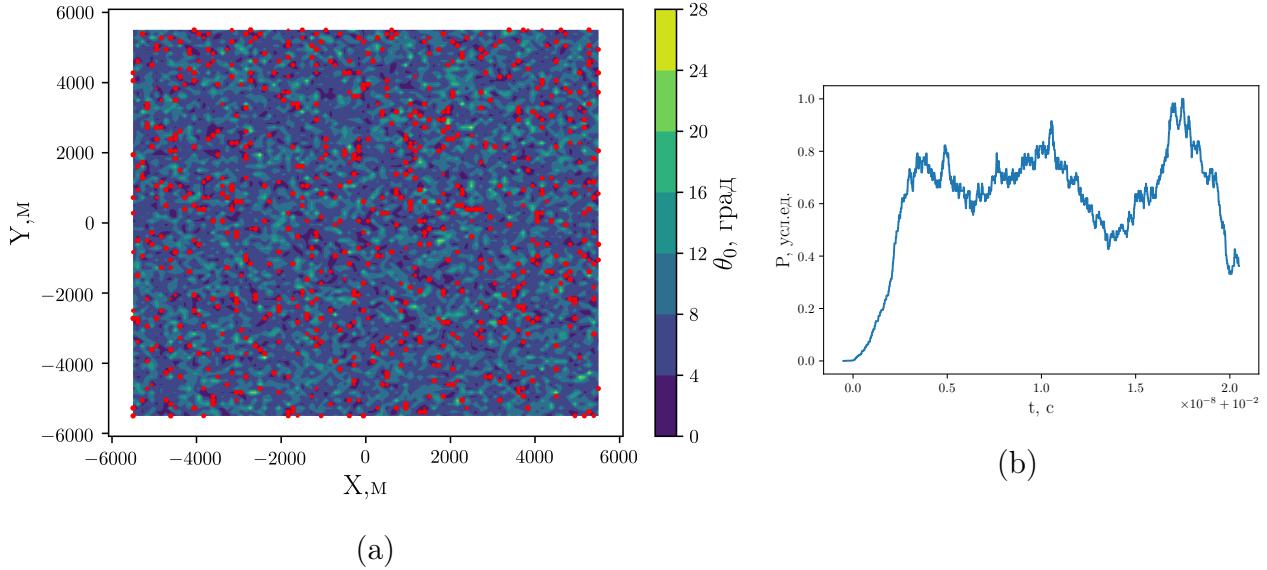


Рис. 7: (а) Вычисление локального угла падения (см.(1)) для радиолокатора, находящегося в точке $(0, 0, h)$. Красным цветом обозначены точки, которые в дальнейшем будут считаться зеркальными и которые будут участвовать в формировании отраженного импульса. (б) Мощность отраженного импульса в зависимости от времени.

A. Моделирование отраженного импульса

Весь проект был написан на Python 3.8 с целью облегчить чтение исходного кода. Также целью было поставлено использование, где это возможно, внешних высокоптимизированных методов библиотеки NumPy, которая позволяет значительно упростить и ускорить операции с массивами данных.

Например, для вычисления локального угла падения по формуле (1) необходимо реализовать вложенный цикл, который будет считать значение θ в каждой точке на выбранной сетке (x, y) . Это, разумеется, несложно сделать, но все вычисления в этом цикле будут производиться в один поток. Но современные процессоры могут производить вычисления в несколько потоков, необходимо лишь правильно написать для этого код. В Python'е многопоточности можно добиться несколькими путями: вручную создавать нужное количество потоков для выбранного числа ядер или же при вычислении использовать библиотеки, в которых это уже реализовано. В данном использовании метода np.einsum() позволило использовать все 8 потоков компьютера, на котором писался этот отчет, а не один.

Все методы в листинге 1 предполагают, что уже выполнено численное моделирование морской поверхности и оттуда получены массивы с координатами $\vec{r} = (x, y, z)$ точек и значениями наклонов $\vec{n} = (\zeta_x, \zeta_y, 1)$.

Листинг 1: Моделирование отраженного импульса

```
1 import numpy as np
2 class Pulse:
3     def __init__(self, r0 = [0,0,3e6],
4                  gane_width=np.deg2rad(1.5),
5                  c = 3e8):
6         self.c = c
7         self.r0 = r0
8         #gane_width ≡ θ3dB
9         gane_width = np.deg2rad(1.5) # Ширина диаграммы направленности в радианах
10        self.gamma = 2*np.sin(gane_width/2)**2/np.log(2)
11
12    def G(self, theta, G0=1):
13        # G -- диаграмма направленности
14        # theta -- угол падения
15        return G0*np.exp(-2/self.gamma * np.sin(theta)**2)
16
17    def R(self, R):
18        Rabs = np.sqrt(np.sum(R**2, axis=0))
19        return Rabs
```

```

20
21 def N(self,n):
22     N = np.sqrt(np.sum(n**2,axis=0))
23     return N
24
25 def theta_calc(self, r, r0):
26     R = r - r0
27     theta = R[-1,:]/self.R(R)
28     return np.arccos(theta)
29
30 def theta0_calc(self,r,r0,n):
31     R = r - r0
32     Rabs = self.R(R)
33     theta0 = np.einsum('ij, ij -> j', R, n)
34     theta0 *= 1/Rabs/self.N(n)
35     return np.arccos(theta0)
36
37 def mirror_sort(self,r,r0,n,theta, err = 1):
38
39     index = np.where(theta < np.deg2rad(2))
40     r     = r [:, index]
41     r0    = r0[:, index]
42     n     = n [:, index]
43     theta = theta[index]
44
45     return r, r0, n, theta
46
47 def power(self, t, omega ,timp ,R, theta,):
48
49     c = self.c
50     G = self.G
51     tau = R/c
52
53     index = [ i for i in range(tau.size) if 0 <= t - tau[i] <= timp ]
54     theta = theta[index]
55     R = R[index]
56     tau = tau[index]
57     # Путь к поверхности
58     #  $\omega\tau \cos(\theta) = kR$ 
59     E0 = G(theta)/R
60     e0 = np.exp(1j*omega*(t - tau*np.cos(theta)) )
61     # Путь от поверхности
62     E0 = E0*G(theta)/R
63     e0 = np.exp(1j*omega*(tau+ tau*np.cos(theta)) )
64
65
66     return np.sum(E0*e0)**2/2

```