

Александр О. Слободянюк

Сергей А. Лебедев

Алексей В. Сакович

Игорь В. Гусев



Национальный исследовательский университет «МИЭТ»



Геофизический Центр РАН



Майкопский государственный технологический университет



Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИмаш)

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАСЧЁТА ВЫСОТЫ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ОСИ АНТЕННЫ АЛЬТИМЕТРА ОТ ПОЛОЖЕНИЯ НАДИРА



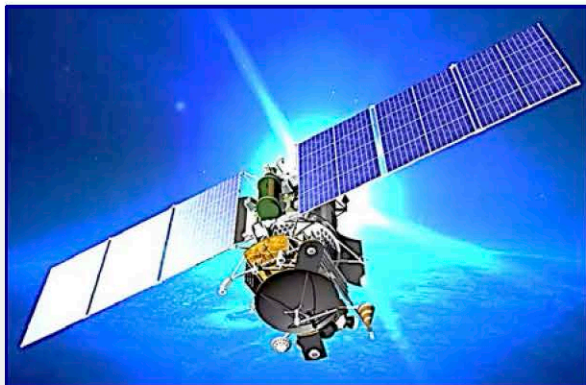
Аннотация



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 вносят вклад в точность измерений.

Геометрия расчёта формы отражённого импульса бралась в соответствии с моделью Брауна, а для расчёта отражённой мощности каждой отдельно взятой элементарной площадки при малых углах падения использовался метод Кирхгофа.

Аннотация

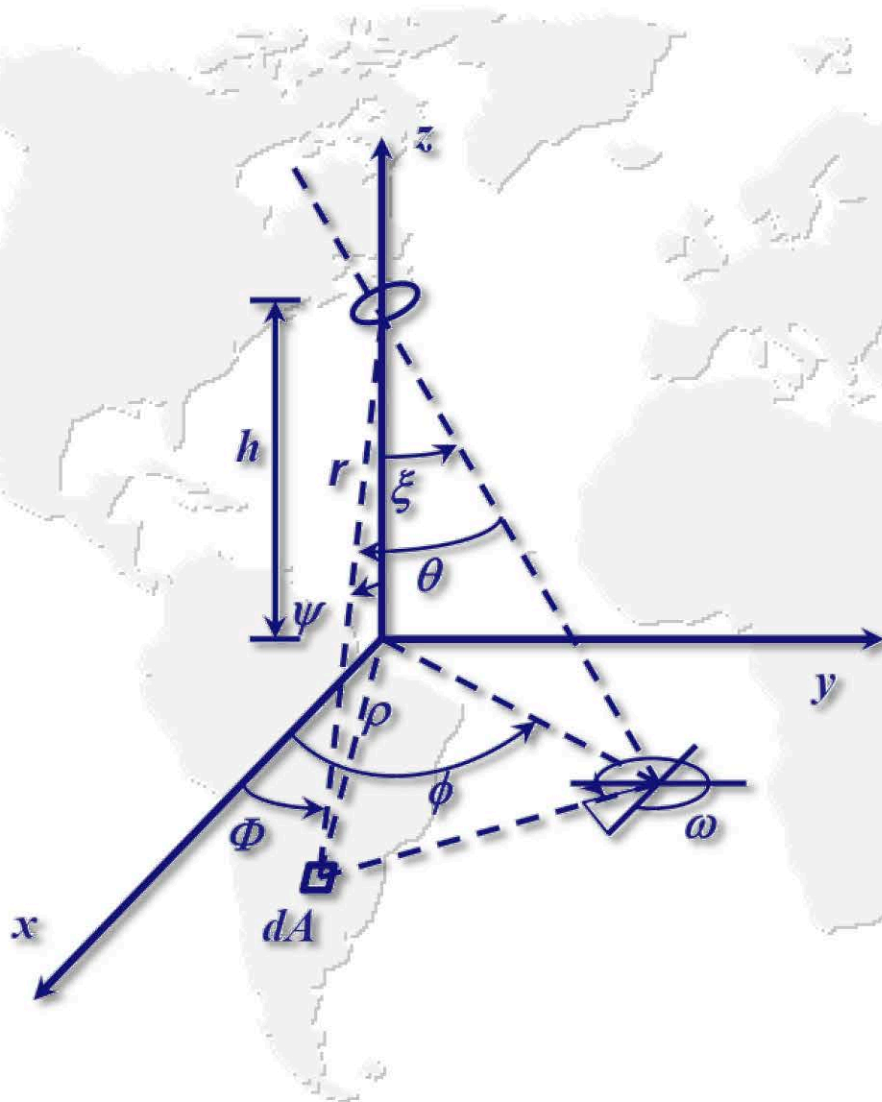


Анализ формы импульса, отражённого от зеркальной поверхности, проводился для модельного эксперимента, когда угол отклонения оси антенны альтиметра от положения надира изменялся в интервале от 0 до $0,5^\circ$.

Обработка формы отражённого импульса алгоритмами ретрекинга Брауна и Ocean-2 показала, что при росте угла отклонения оси антенны происходит смещение середины переднего фронта почти на 3 гейта. При расчётах высот морской поверхности это может приводить к ошибке около 2 м. При этом полученные из ретрекинга значимые высоты волн также уменьшаются.

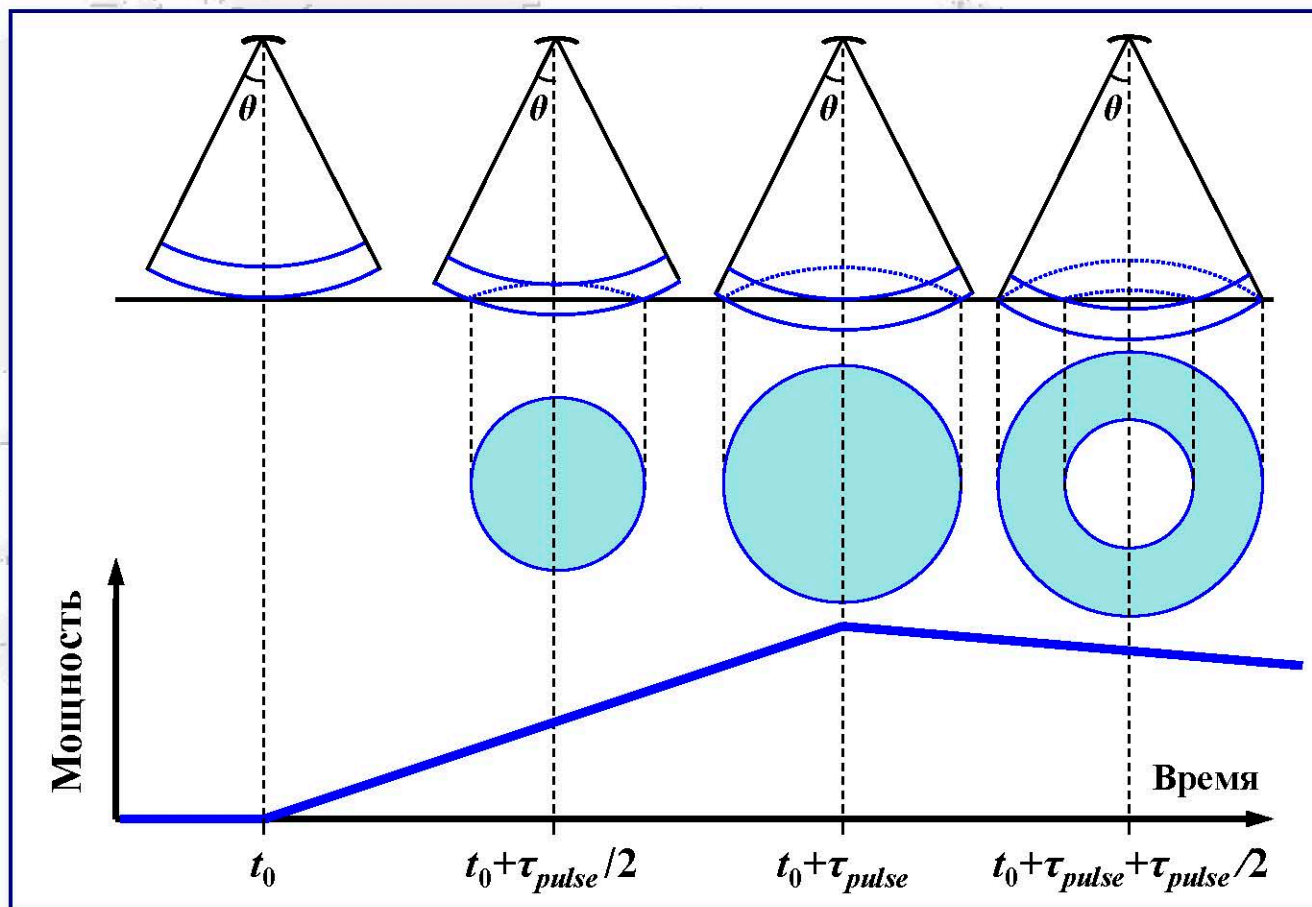
На практике отклонение оси антенны от положения надира не превышает $0,2^\circ$, что соответствует ошибке примерно 0,3 м.

Геометрия области зондирования по методу Брауна



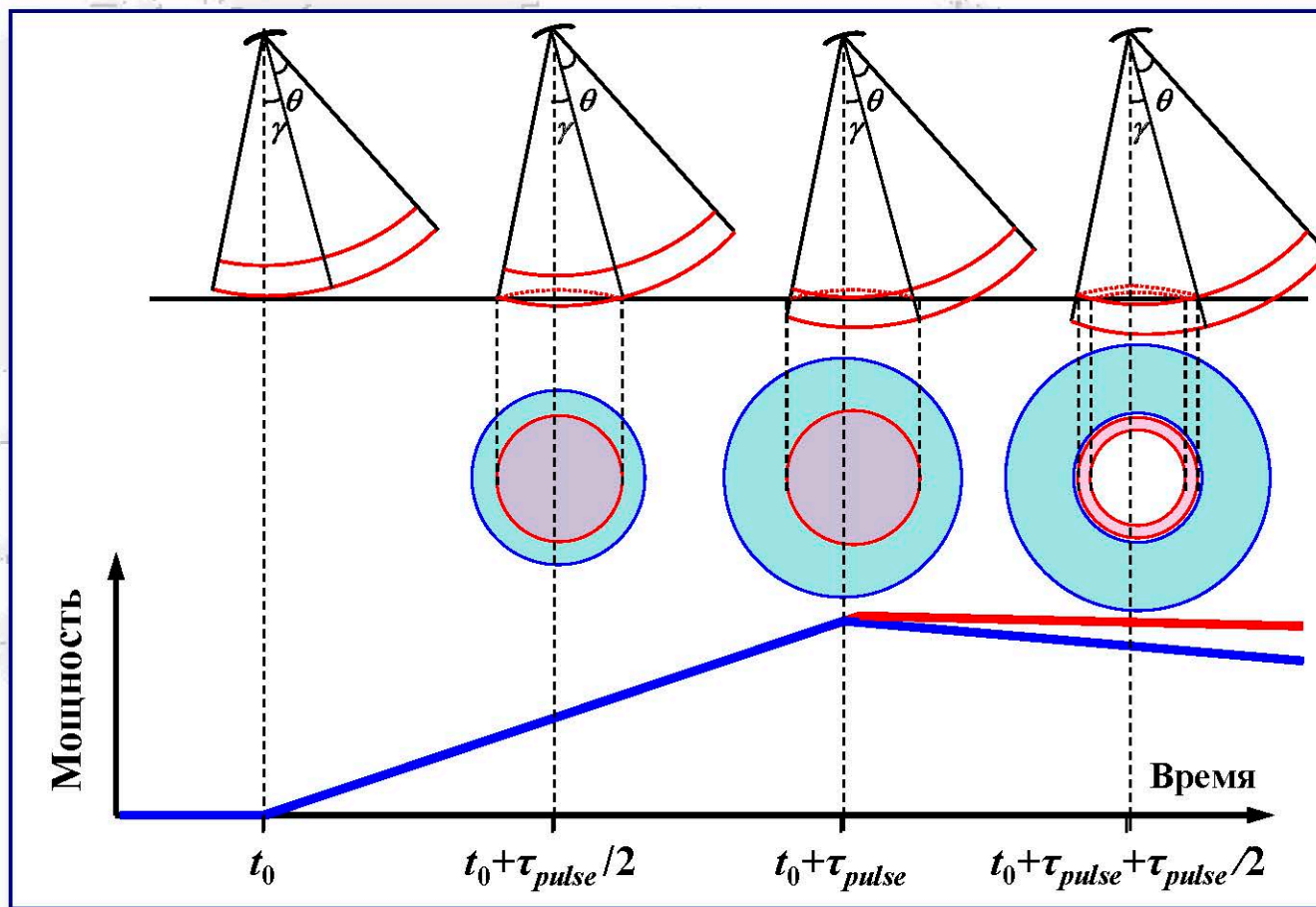
- r - расстояние от радара до единичного элемента поверхности рассеяния dA
- ω - угол между осью антенны и направлением на dA в плоскости xu
- ψ – угол между направлением на dA и осью $0z$
- φ - угол между направлением на dA и осью $0x$ в плоскости xu
- H – высота орбиты спутника относительно подстилающей поверхности

Форма отражённого импульса от зеркальной поверхности в положении надира



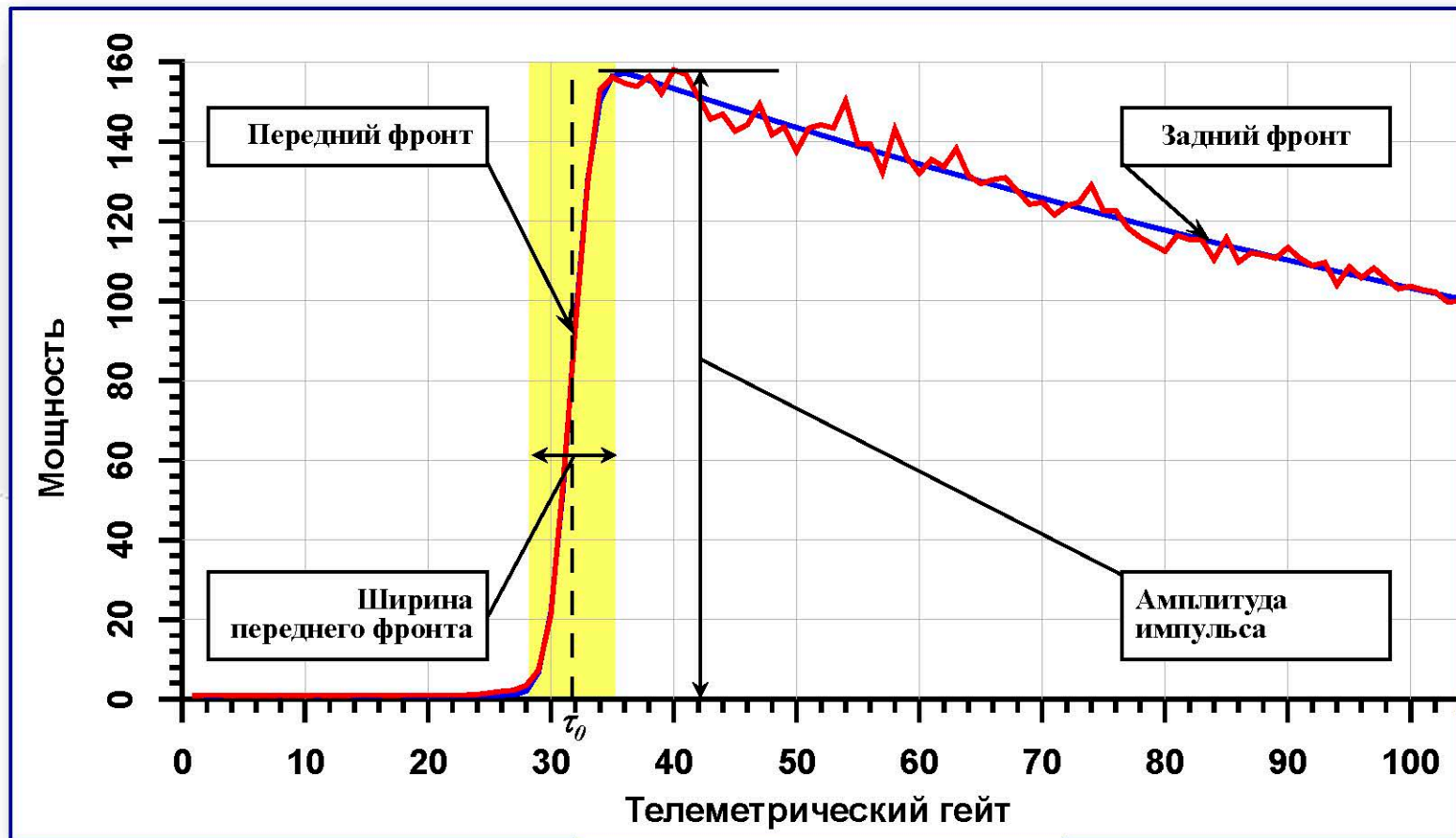
Зависимость формы и площади сегмента зеркальной подстилающей поверхности, с которого отражается зондирующий импульс альтиметра от времени (θ — угловое разрешение антенны альтиметра, τ_{pulse} — длительность зондирующего импульса)

Форма отражённого импульса от зеркальной поверхности при отклонении от положения надира



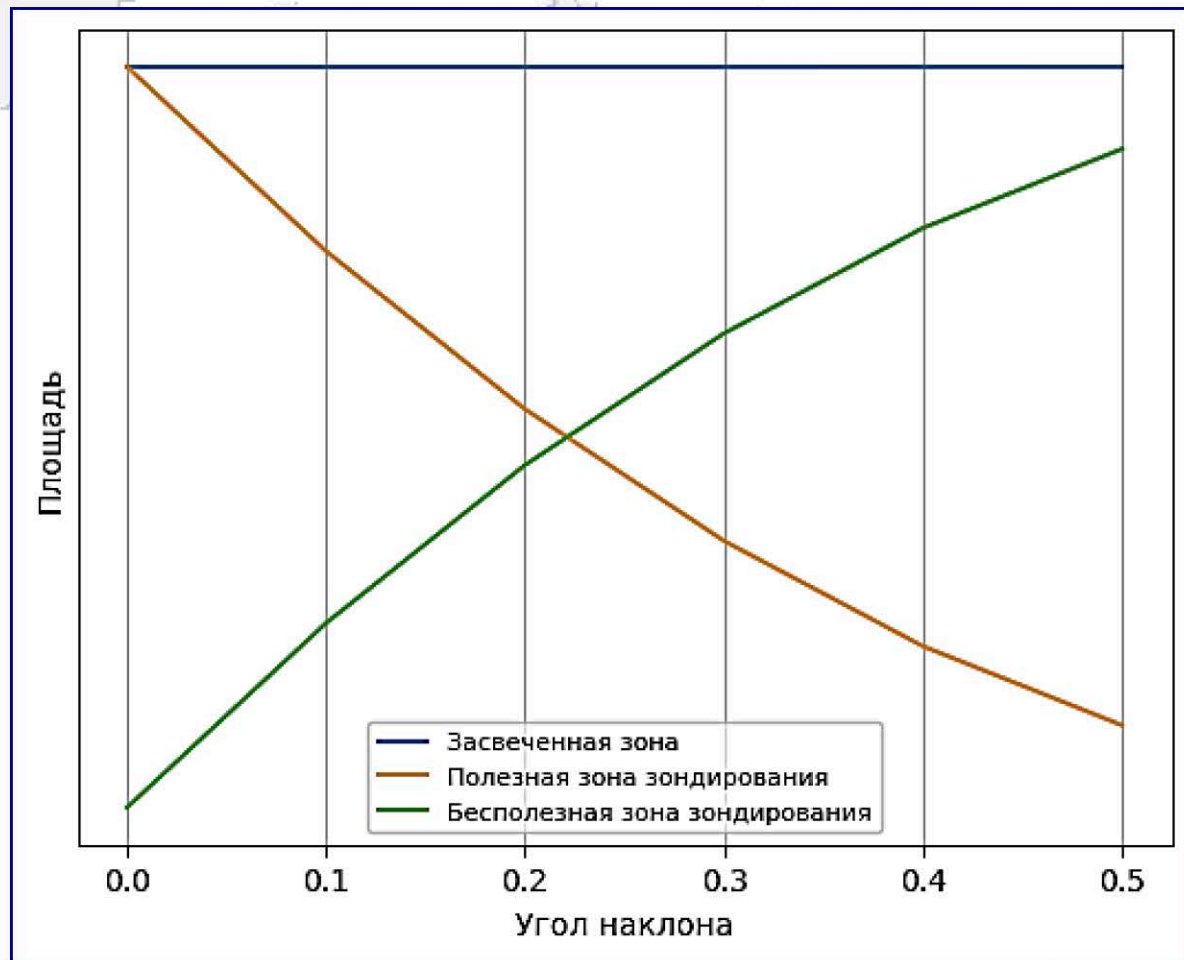
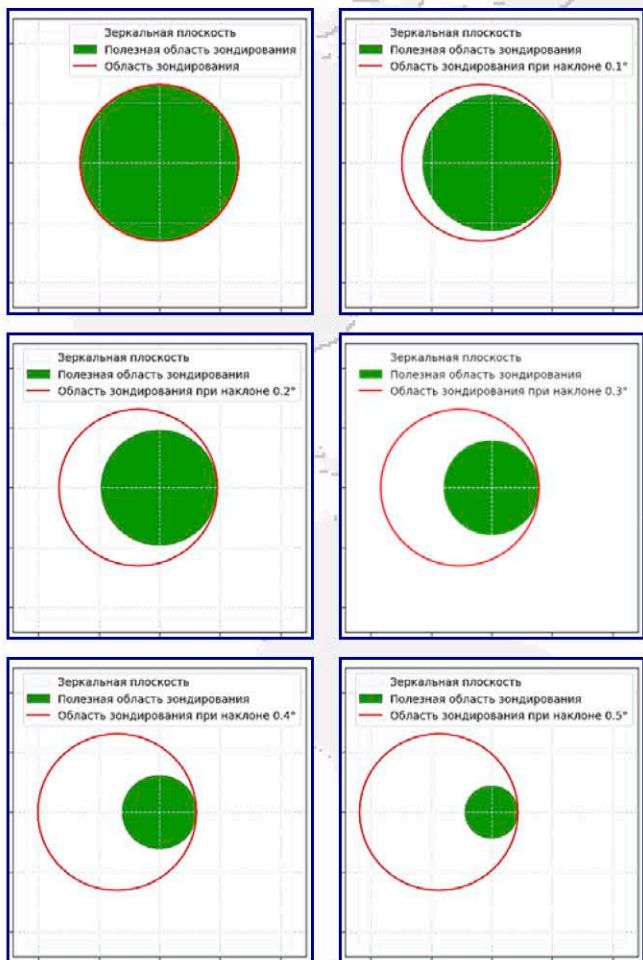
Зависимость от времени формы и площади сегмента подстилающей поверхности, с которого отражается зондирующий импульс альтиметра при отклонении антенны от положения надира на угол γ (красная линия). Синим цветом показаны формы и площади при антенне в положении надира

Элементы формы отражённого импульса



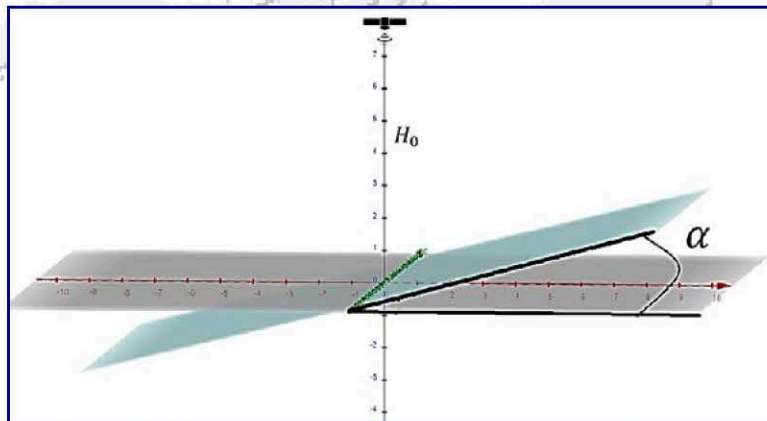
Форма импульса, отражённого от безграничной подстилающей поверхности, аппроксимированная по формуле Брауна (синяя линия) и осреднённая за 1 с форма отражённого импульса для условий открытого океана (красная линия), где τ_0 — середина переднего фронта или «эпоха». Жёлтой областью выделена ширина переднего фронта, зависящая от значимой высоты волн (h_{swH})

Засвеченная площадь при отклонении от положения надира



Зависимость полезной засвеченной площади от угла отклонения от положения надира

Моделирование отраженного импульса от зеркальной плоскости



- H_0 - высота зондирования альтиметром поверхности
- α – угол между зеркальной поверхностью и плоскостью xu

Интегрирование по рассеивающей площадке для сферической волны с учётом длительности зондирующего импульса позволяет найти профиль отражённого импульса.

Механизм обратного рассеяния при малых углах падения является квазизеркальным, при этом отражение импульса происходит на участках волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению.

Формула поля, излучаемое антенной радиолокатора в зеркальную точку с радиус-вектором \vec{r}

$$E_S(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{r} \exp(i(\omega t - \vec{k}\vec{R})) U(t) G(\theta),$$

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

Моделирование отраженного импульса от зеркальной плоскости

$$E = \frac{E_0}{R^2} \exp(-2ik\vec{R}) \sigma^0 G^2(\theta)$$

Уравнение амплитуды поля E вблизи приемной антенны где σ^0 – сечение обратного рассеяния площадки., которое при малых углах зондирования рассчитывается по методу Киргофа.

$$E \sim \sum_{j=1}^M \frac{E_0}{R_j^2} \exp(-2ik_j R_j) G^2(x_j, y_j, \theta_0)$$

Результат интегрирования уравнения по всем отражающим точкам где M – количество точек, x_j, y_j – координаты j -ой отражающей точки, R_j – расстояние от спутника до j -ой точки.

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

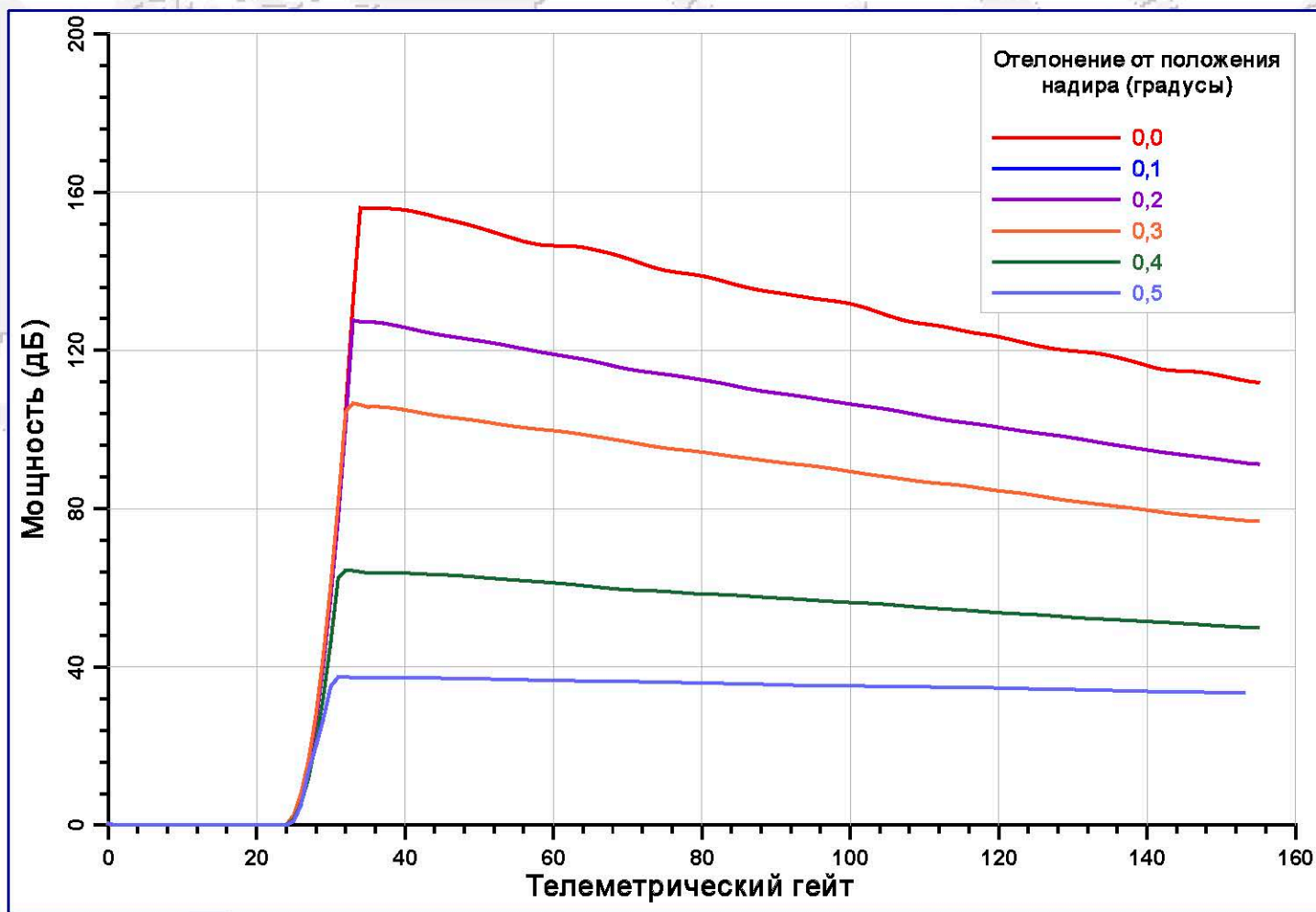
Результирующая мощность отражённого импульса

Моделирование отраженного импульса от зеркальной плоскости

Начальные условия для модели:

- $H_0 = 1000 \text{ км}$
- $\theta_{\text{зонд}} = 1.5^\circ$
- $G_0 = 10$ (коэффициент усиления антенны)
- $\tau = 3.125$ наносекунд
- $P_{\text{излучения}} = 50$ Ватт
- $E_0 = 12250$ В/м
- $S_{\text{плоскости}} = 22 \times 22 \text{ км}^2$
- α берется от 0° до 0.5° с шагом 0.1
- $\nu = 20$ Гц ($\omega = 2\pi \cdot 20$)

Зависимость формы отражённого импульса от угла отклонения от положения надира



Алгоритм ретрекинга по Брауну

$$P(t) = K \frac{\sigma_0}{2} \cdot \exp\left(-\frac{4}{\gamma} \cdot \sin(\xi)^2\right) \cdot [1 + \operatorname{erf}(u)] \exp(-v)$$

$$K = 1, \quad \gamma = 0,724 (\sin(\theta_{3dB}))^2,$$

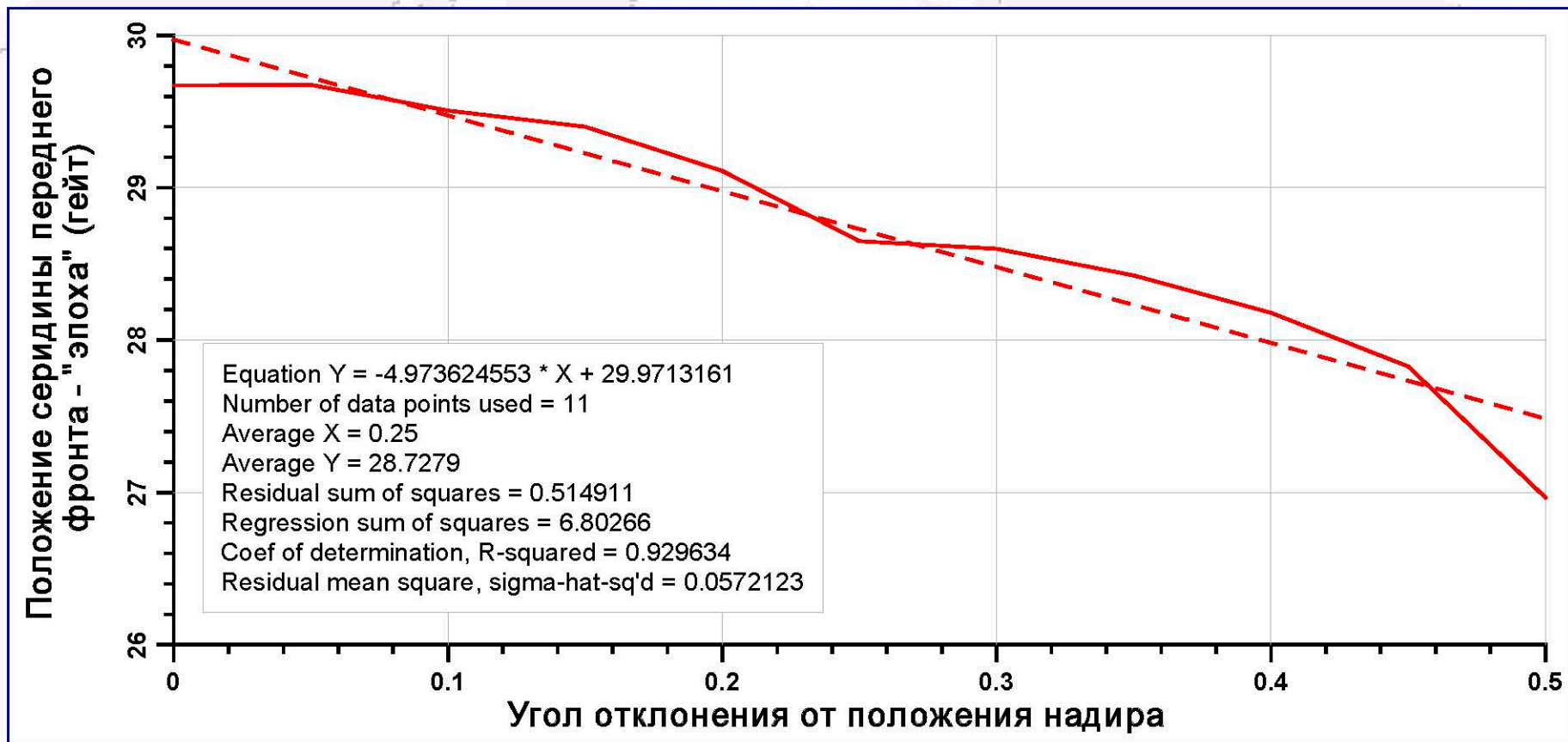
$$u = \frac{t - \tau - \alpha \sigma_c^2}{\sqrt{2} \sigma_c}, \quad v = \alpha \left(t - \tau - \frac{\alpha}{2} \sigma_c^2 \right),$$

$$\alpha = \frac{4c}{\gamma H \left(1 + \frac{H}{R} \right)} \left(\cos(2\xi) - \frac{(\sin(2\xi))^2}{\gamma} \right),$$

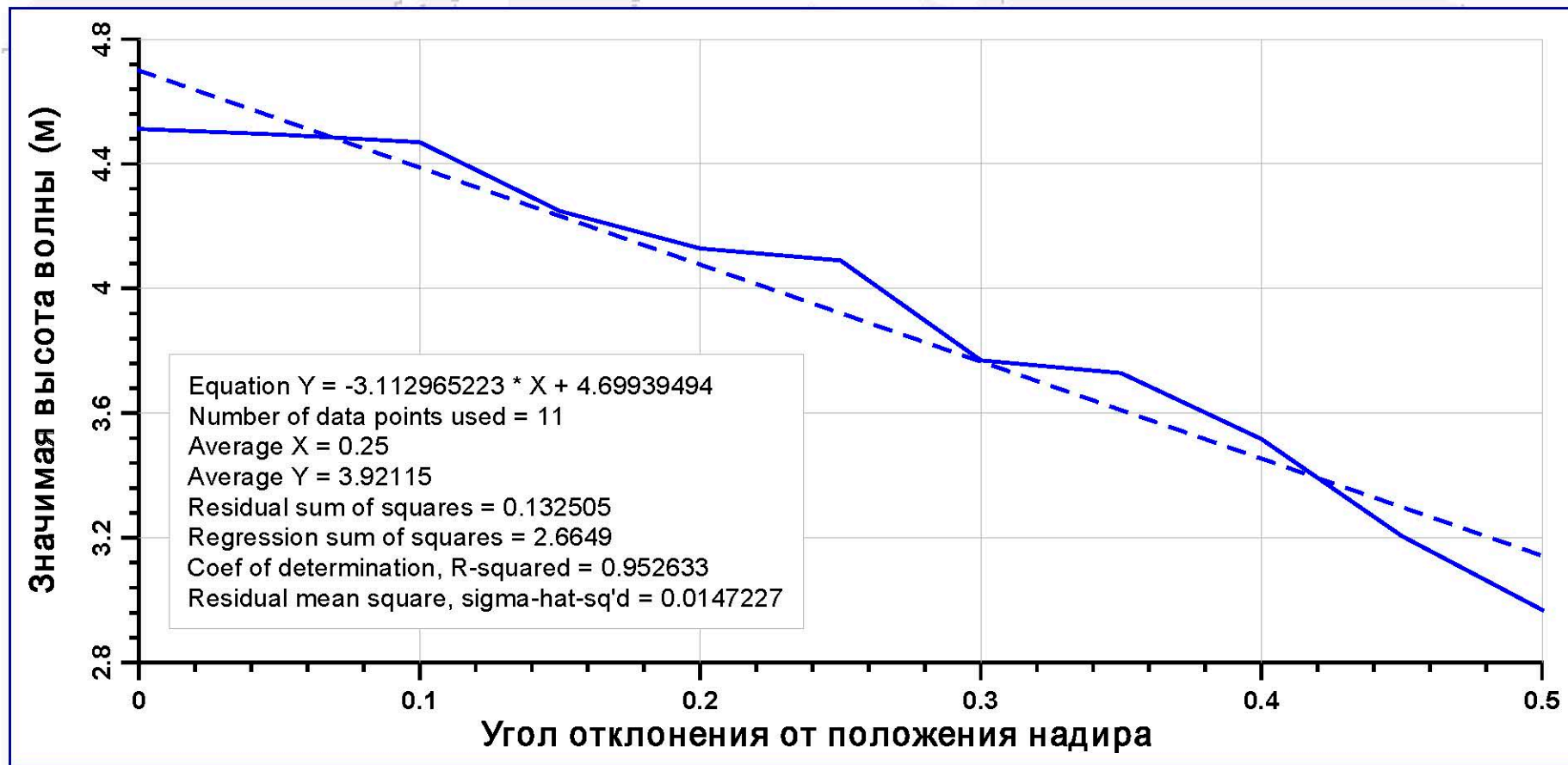
$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_P^2 + \left(\frac{h_{swh}}{2c} \right)^2}, \quad \sigma_P = \frac{0,5}{BW}.$$

- τ – «эпоха», номер гейта;
- σ_0 – коэффициент обратного рассеивания;
- h_{swh} – значимая высота морских волн;
- ξ – угол отклонения антенны от положения надира;
- θ_{3dB} – угловое разрешение антенны;
- H – расстояние от спутника до поверхности;
- R – радиус Земли;
- c – скорость света.

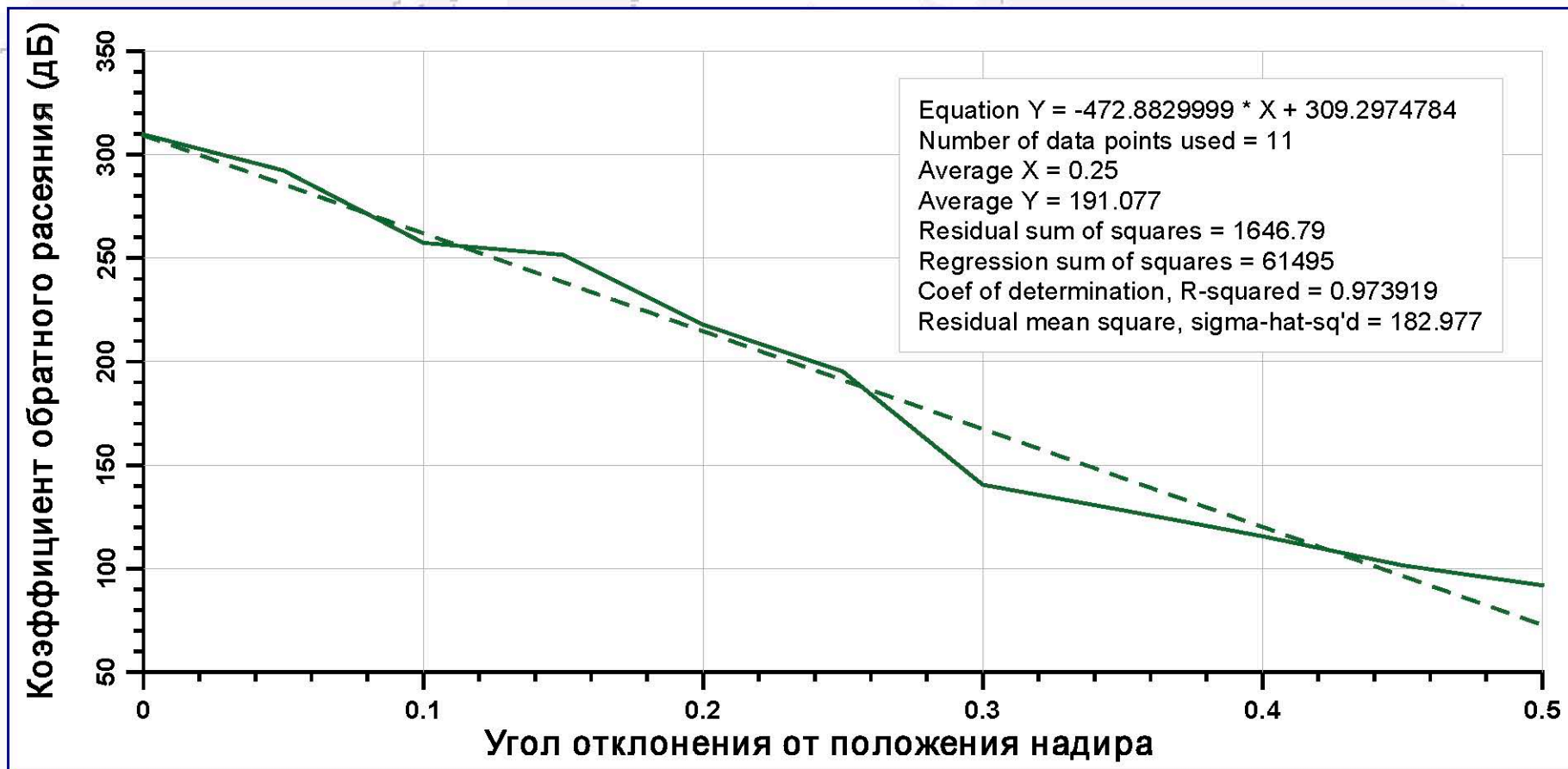
Зависимость параметров отражённого импульса от угла отклонения от положения надира



Зависимость параметров отражённого импульса от угла отклонения от положения надира



Зависимость параметров отражённого импульса от угла отклонения от положения надир



Заключение

Отклонение оси антенны альтиметра от положения надира :

- Приводит к уменьшению «полезной» засвеченной области;
- Приводит к сдвигу середины переднего фронта отражённого импульса («эпохи») в сторону уменьшения $\tau = -4,973624553 \cdot \varphi + 29.9713161$ (φ – угол отклонения), что в свою очередь приводит к уменьшению времени отражения
- При отклонении на $0,5^\circ$ происходит смещение середины переднего фронта почти на 3 гейта, что может приводить при расчётах высот морской поверхности к ошибке около 2 м;
- Уменьшаются величины значимых высот волн, что означает изменения угла наклона переднего фронта;
- При увеличении угла отклонения уменьшается коэффициент обратного рассеяния, что может привести к ошибке расчеты модуля приводного ветра.



Спасибо за внимание

