

Исследование возможности определения высоты значительного волнения из космоса по взаимной корреляционной функции двух отраженных сигналов, разнесенных по частоте

*Титченко Ю.А. (1), Караев В.Ю. (1), Ковалдов Д.А. (1),
Байдаков Г.А. (2,1)*

(1) Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

(2) Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва

Актуальность

Одним из самых важных параметров определяющим энергию и интенсивность волнения является высота волн.

Существуют спутниковые радио альтиметры для измерения уровня воды и высоты волн. Есть традиционный подход на основе анализа формы отраженного импульса.

Но есть так же принципиально другой подход использующий для оценки высот волн двухчастотную взаимную корреляционную функцию.

Weissman, 1973

Гарнакерьян, Сосунов, 1978

Ка, Baskakov, 2015

Для создания новых схем дистанционного зондирования для восстановления дисперсии высот и уклонов волн и других параметров волн предлагается перенести подход анализа двухчастотной взаимной корреляционной функции на бистатистический случай.

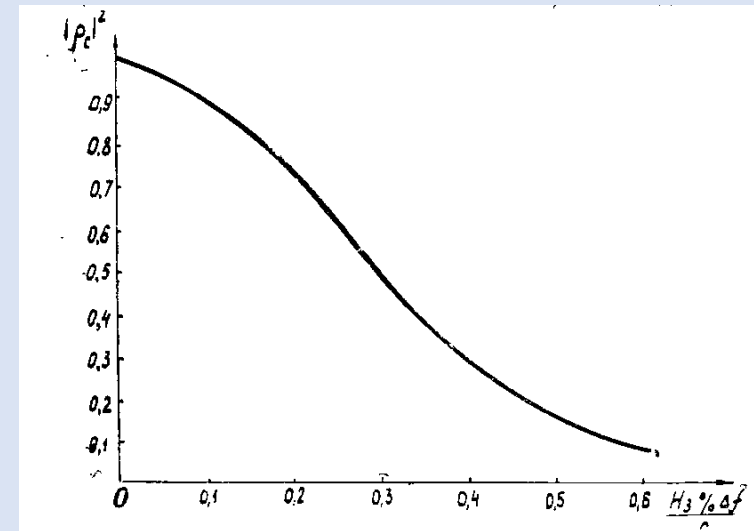
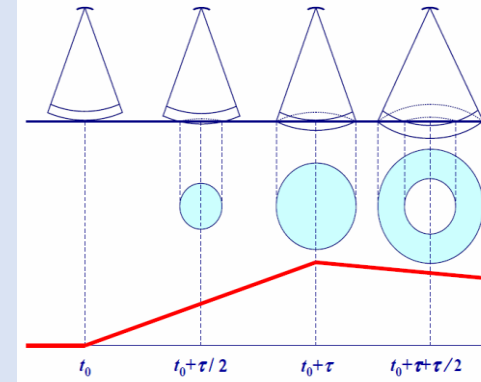
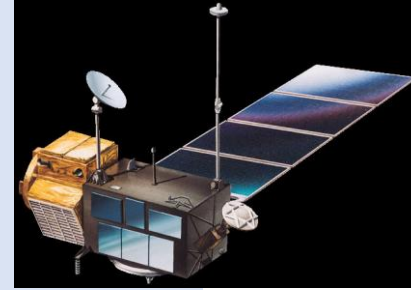


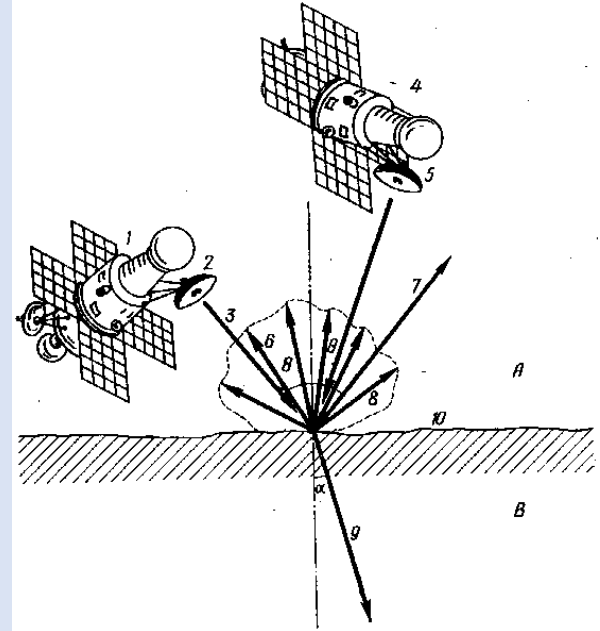
Рис. 15. Зависимость квадрата модуля коэффициента частотной корреляции от $\frac{H_{3\%} \Delta f}{c}$

Цель работы

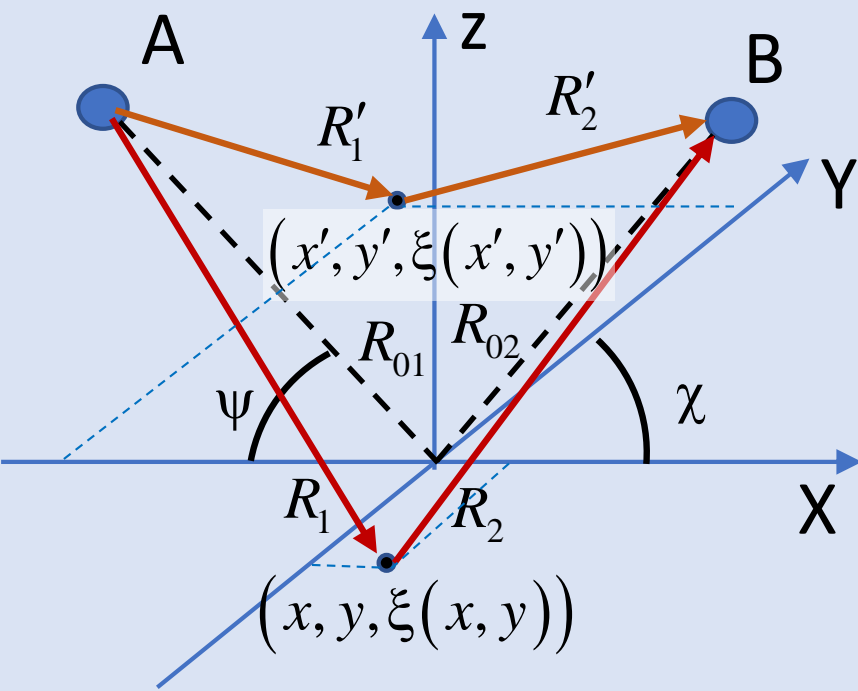
- Традиционный подход (основанный на анализе формы отраженного импульса) сегодня невозможно распространить на бистатическую схему измерения.
- Недостатком двухчастотной функции взаимной корреляции является сложность использования в спутниковых системах дистанционного зондирования Земли..



- Целью данного исследования является анализ условий применимости подхода восстановления SWH, основанного на измерении функции взаимной корреляции двух сигналов близких частот, отраженных морской поверхностью, в бистатической постановке задачи.
- В данной работе рассматривается вариант реализации спутниковой бистатической постановки задачи измерения значительной высоты волны на основе подхода измерения взаимной корреляционной функции двух отраженных сигналов, разнесенных по частоте.



Постановка задачи



$$S_x = \frac{R_{xx}''^2 k_2 k_1}{q_z^2(k_1) \sigma_{xx}^2} - 2a_x, \quad S_y = \frac{R_{yy}''^2 k_2 k_1}{\sigma_{yy}^2 q_z^2(k_1)} - 2a_y,$$

$$a_x = \frac{-2,76 \sin^2 \psi}{R_{01}^2 \delta_{1x}^2} - \frac{2,76 \sin^2 \chi}{R_{02}^2 \delta_{2x}^2}, \quad a_y = \frac{-2,76}{R_{01}^2 \delta_{1y}^2} - \frac{2,76}{R_{02}^2 \delta_{2y}^2}, \quad R_{xx}'' = R_{1xx}'' + R_{2xx}'',$$

$$R_x' = R_{1x}' + R_{2x}', \quad R_{yy}'' = R_{1yy}'' + R_{2yy}'', \quad q_z^2(k_1) = k_1^2 (R_{1z}' + R_{2z}')^2, \quad R_{1x}' = \cos \psi,$$

$$R_{2x}' = -\cos \chi, \quad R_{1z}' = -\sin \psi, \quad R_{1xx}'' = \sin^2 \psi / R_{01}, \quad R_{2xx}'' = \sin^2 \chi / R_{02},$$

$$R_{1yy}'' = 1/R_{01}, \quad R_{2z}' = -\sin \chi, \quad R_{2yy}'' = 1/R_{02}, \quad \sigma_{\xi}^2 = \langle \xi x \xi \rangle, \quad \sigma_{xx}^2 = \left\langle \frac{\partial \xi}{\partial x} x \frac{\partial \xi}{\partial x} \right\rangle,$$

$$\sigma_{yy}^2 = \left\langle \frac{\partial \xi}{\partial y} x \frac{\partial \xi}{\partial y} \right\rangle - \text{are the sea surface statistical parameters.}$$

Волновые числа $\frac{\Delta k}{k_1} = \frac{k_2 - k_1}{k_1} \ll 1$

Мы предполагаем, что передатчик и приемник имеют общие антенны для обеих частот. Антенны приемника В и передатчика А могут отличаться. Диаграммы направленности антенн описываются гауссовой формой:

$$G_1(x, y) = e^{\left(-1,38 \frac{\sin^2 \psi}{R_{01}^2 \delta_{1x}^2} x^2 - 1,38 \frac{y^2}{R_{01}^2 \delta_{1y}^2} \right)},$$

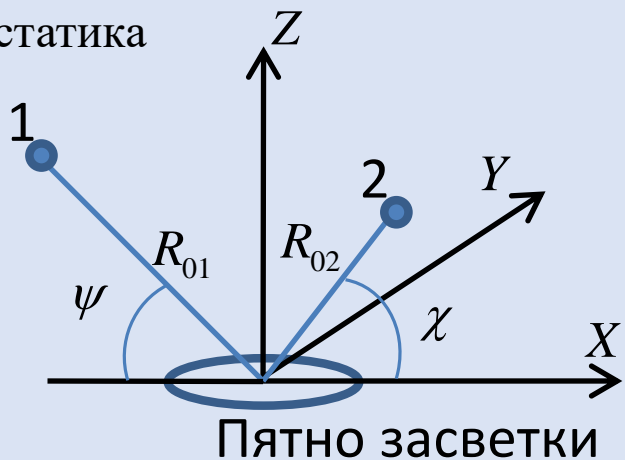
$$G_2(x, y) = e^{\left(-1,38 \frac{\sin^2 \chi}{R_{02}^2 \delta_{2x}^2} x^2 - 1,38 \frac{y^2}{R_{02}^2 \delta_{2y}^2} \right)}$$

При небольшом отклонении приемника от зеркального луча ($<20-25^\circ$, так чтобы рассеяние можно описать приближением Кирхгофа) можно записать выражение для модуля коэффициента взаимной корреляции, которое будем обозначать как коэффициент корреляции сигналов (SCC):

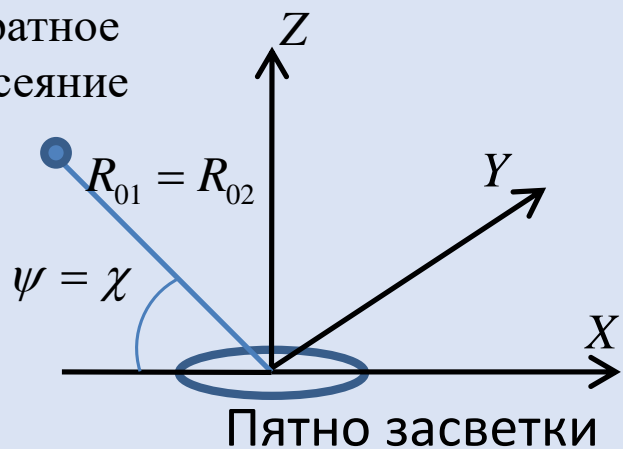
$$|\rho(\Delta k)| = \frac{\exp \left\{ -\frac{R_z'^2 \sigma_{\xi}^2 (k_1 - k_2)^2}{2} - \frac{2a_x^2 R_x'^2 (k_1 - k_2)^2}{S_x (S_x^2 + (k_1 - k_2)^2 R_{xx}'')} \right\}}{\sqrt[4]{1 + \frac{(k_1 - k_2)^2 R_{yy}''^2}{S_y^2}} \sqrt[4]{1 + \frac{(k_1 - k_2)^2 R_{xx}''^2}{S_x^2}}}$$

Коэффициент корреляции сигналов (SCC)

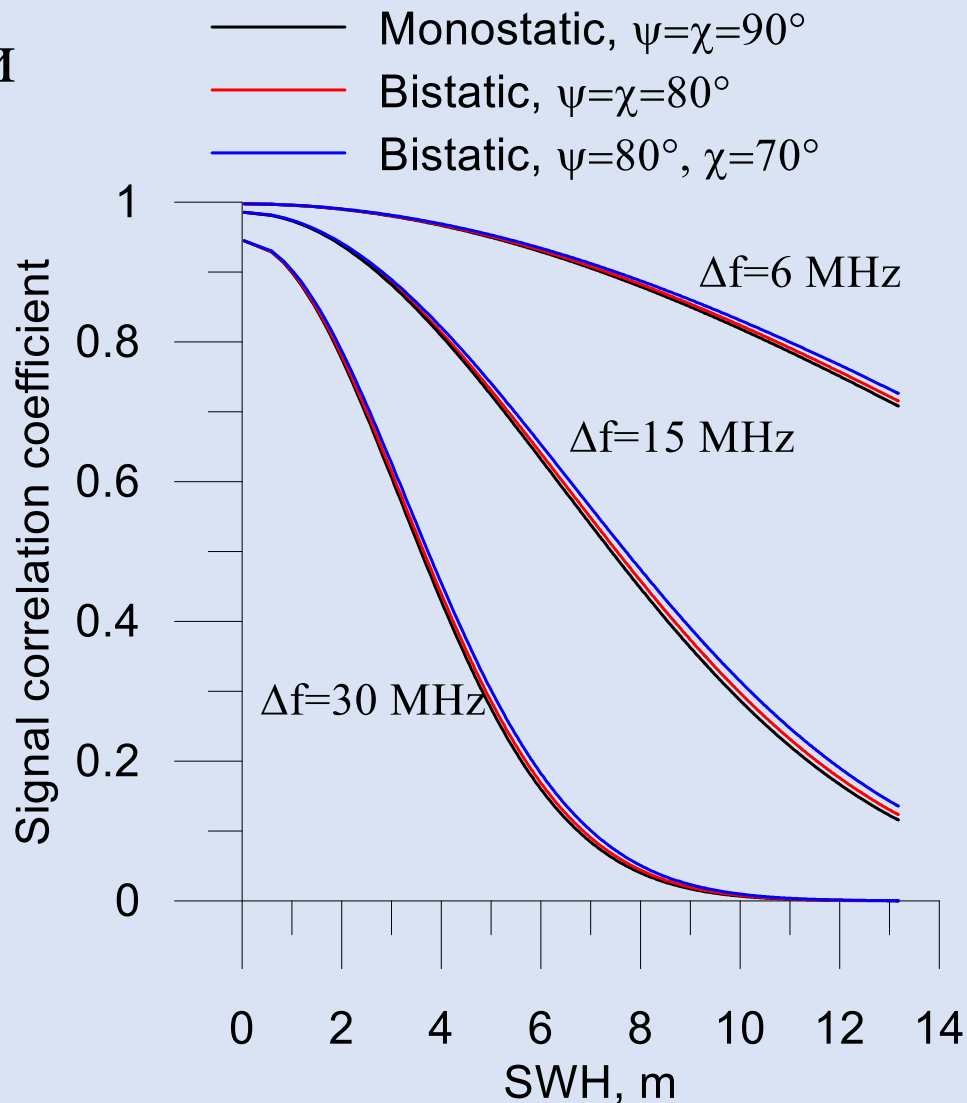
Бистатика



Обратное рассеяние



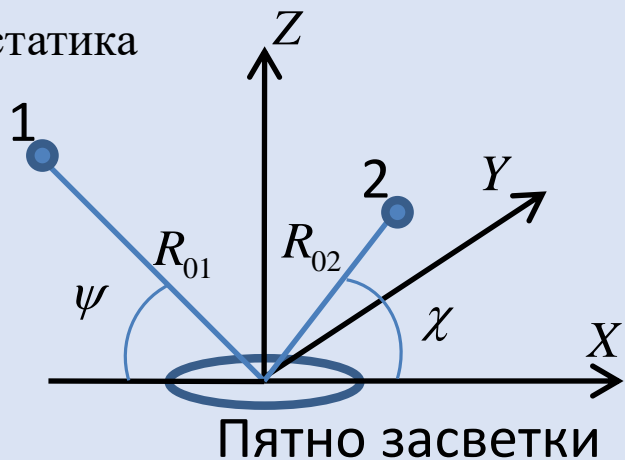
Ки-диапазон
Дальности 10 км



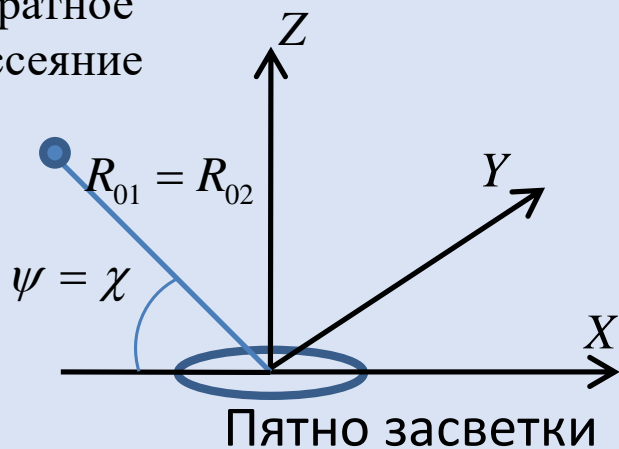
Это основная зависимость используемого подхода, показывающая чувствительность SCC к SWH для трех вариантов частотных баз излучаемых волн.

Коэффициент корреляции сигналов (SCC)

Бистатика

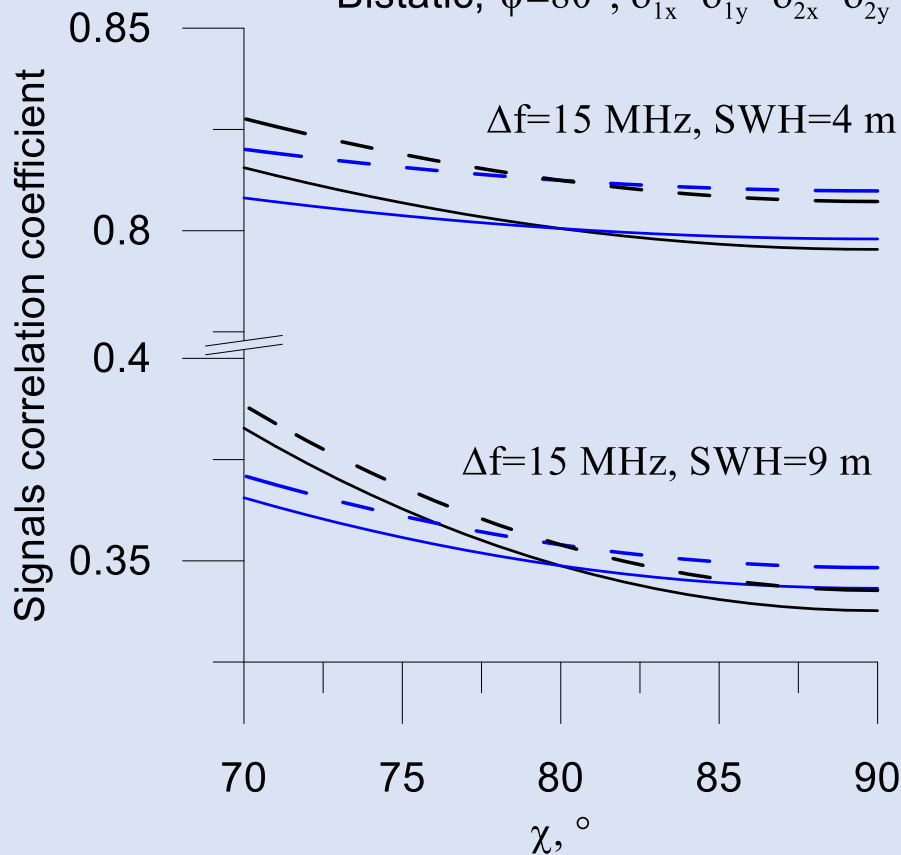


Обратное рассеяние



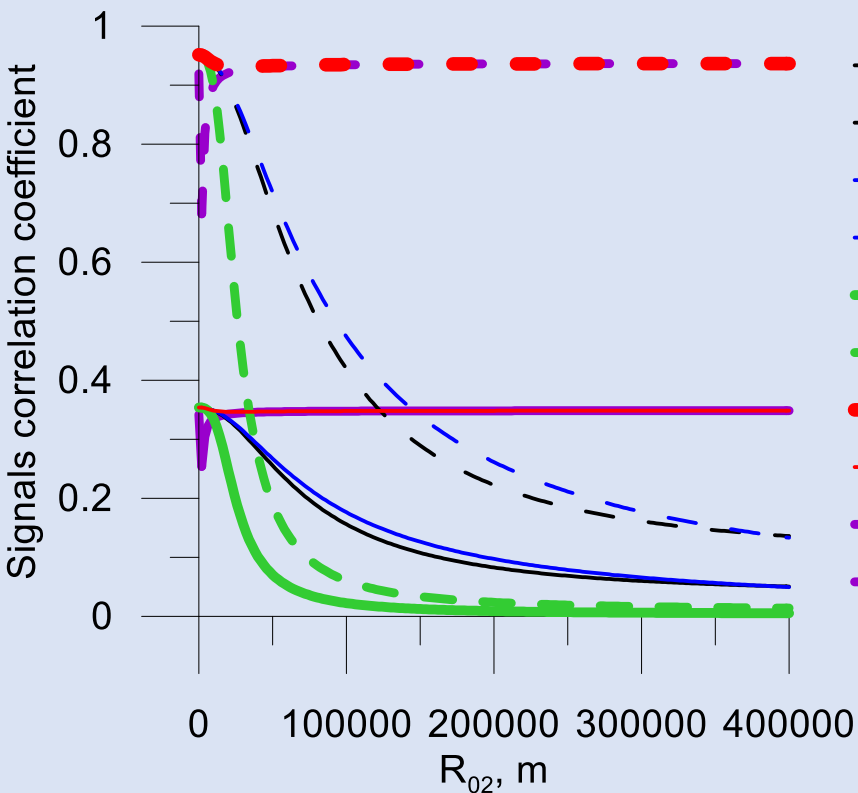
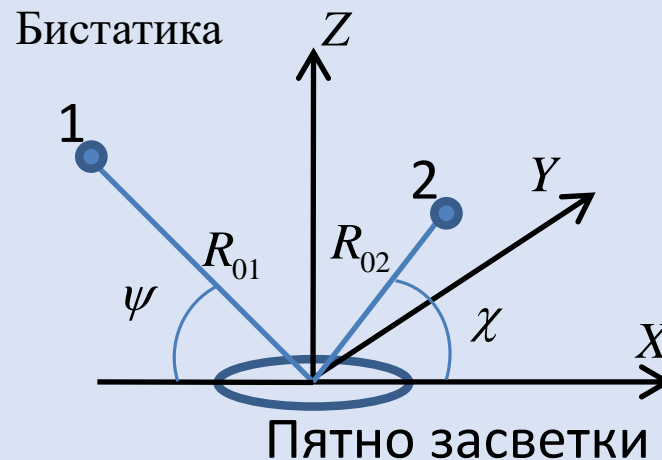
Ки-диапазон
Дальности 10 км

- Monostatic, $\delta_{1x}=\delta_{1y}=\delta_{2x}=\delta_{2y}=1^\circ$
- - Monostatic, $\delta_{1x}=\delta_{1y}=\delta_{2x}=\delta_{2y}=0.1^\circ$
- Bistatic, $\psi=80^\circ$, $\delta_{1x}=\delta_{1y}=\delta_{2x}=\delta_{2y}=1^\circ$
- - Bistatic, $\psi=80^\circ$, $\delta_{1x}=\delta_{1y}=\delta_{2x}=\delta_{2y}=0.1^\circ$



Отклонение от зеркального луча мало влияет на SCC и, соответственно, на алгоритм поиска.

Коэффициент корреляции сигналов (SCC)



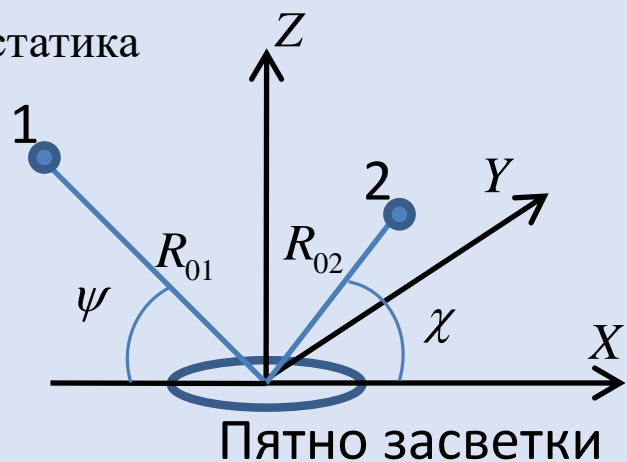
- $\delta_{1x}=\delta_{1y}=\delta_{2x}=\delta_{2y}=1^\circ, R_{01}=400 \text{ km}, SWH=9 \text{ m}$
- - $\delta_{1x}=\delta_{1y}=\delta_{2x}=\delta_{2y}=1^\circ, R_{01}=400 \text{ km}, SWH=2 \text{ m}$
- - - $\delta_{1x}=\delta_{1y}=30^\circ, \delta_{2x}=\delta_{2y}=1^\circ, R_{01}=20 \text{ 000 km}, SWH=2 \text{ m}$
- — — $\delta_{1x}=\delta_{1y}=30^\circ, \delta_{2x}=\delta_{2y}=1^\circ, R_{01}=20 \text{ 000 km}, SWH=9 \text{ m}$
- — — $\delta_{1x}=\delta_{1y}=30^\circ, \delta_{2x}=\delta_{2y}=1^\circ, R_{01}=10 \text{ km}, SWH=9 \text{ m}$
- - - $\delta_{1x}=\delta_{1y}=30^\circ, \delta_{2x}=\delta_{2y}=1^\circ, R_{01}=10 \text{ km}, SWH=2 \text{ m}$
- • • $\delta_{1x}=\delta_{1y}=\delta_{2x}=\delta_{2y}=1^\circ, R_{01}=10 \text{ km}, SWH=2 \text{ m}$
- — — $\delta_{1x}=\delta_{1y}=\delta_{2x}=\delta_{2y}=1^\circ, R_{01}=10 \text{ km}, SWH=9 \text{ m}$
- - - $\delta_{1x}=\delta_{1y}=1^\circ, \delta_{2x}=\delta_{2y}=30^\circ, R_{01}=10 \text{ km}, SWH=2 \text{ m}$
- — — $\delta_{1x}=\delta_{1y}=1^\circ, \delta_{2x}=\delta_{2y}=30^\circ, R_{01}=10 \text{ km}, SWH=9 \text{ m}$

Если передатчик и приемник расположены на спутнике, SCC слишком мал для использования. При расстоянии до передатчика (или приемника) 10 км SCC может использоваться.

Ку-диапазон

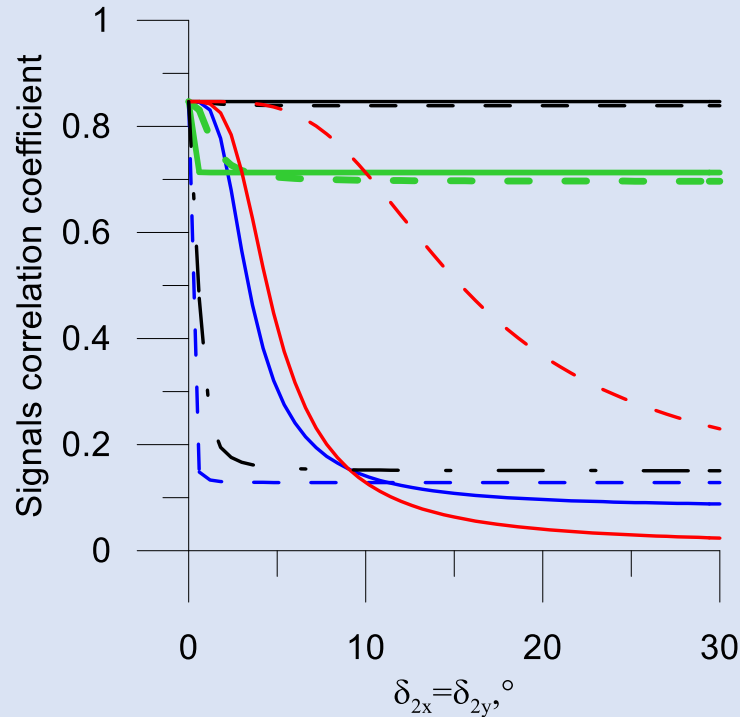
Коэффициент корреляции сигналов (SCC)

Бистатистика

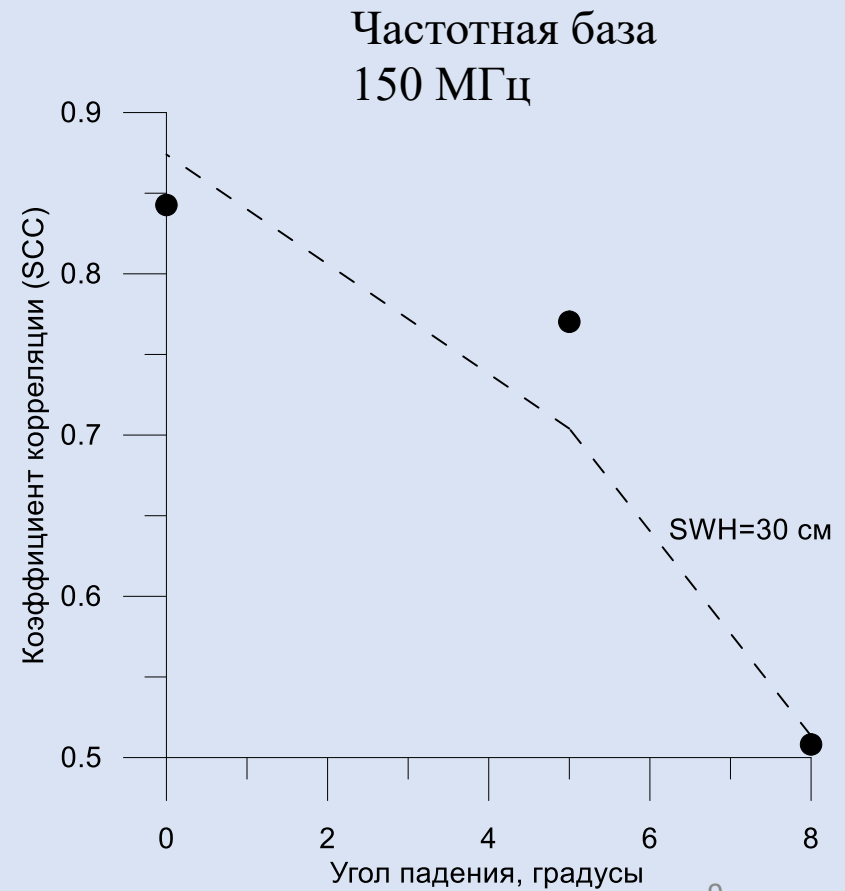
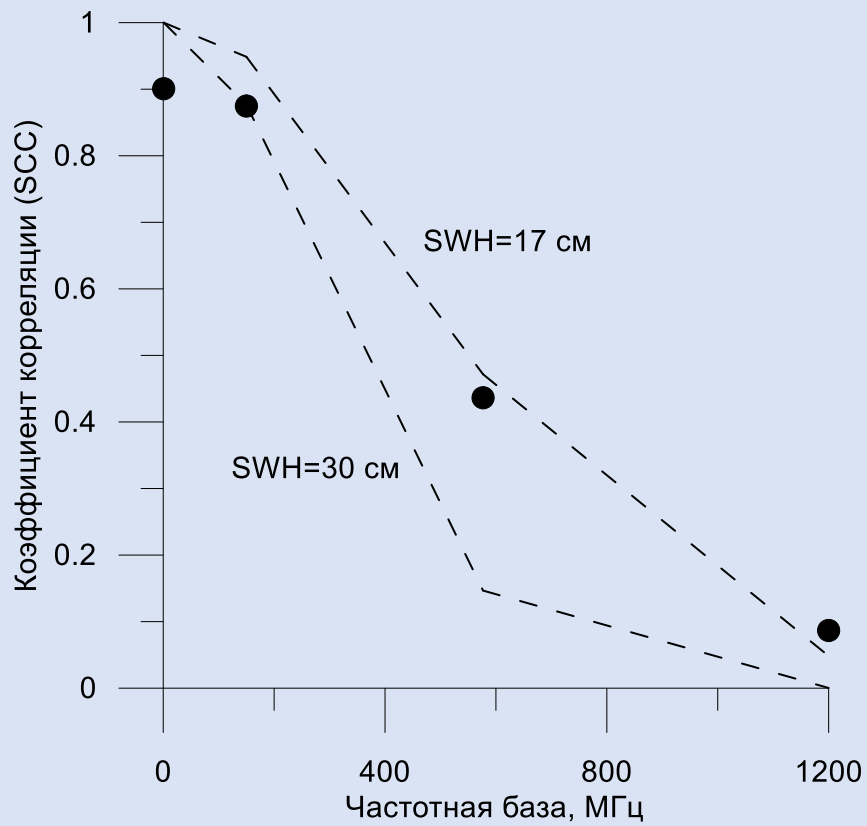


- $\delta_{1x}=\delta_{1y}=1^\circ, R_{01}=50 \text{ m}, R_{02}=50 \text{ m}, SWH=9 \text{ m}, \Delta f=6 \text{ MHz}$
- - - $\delta_{1x}=\delta_{1y}=1^\circ, R_{01}=10 \text{ km}, R_{02}=10 \text{ km}, SWH=9 \text{ m}, \Delta f=6 \text{ MHz}$
- . - $\delta_{1x}=\delta_{1y}=10^\circ, R_{01}=400 \text{ km}, R_{02}=400 \text{ km}, SWH=9 \text{ m}, \Delta f=6 \text{ MHz}$
- $\delta_{1x}=\delta_{1y}=10^\circ, R_{01}=10 \text{ km}, R_{02}=10 \text{ km}, SWH=9 \text{ m}, \Delta f=6 \text{ MHz}$
- - - $\delta_{1x}=\delta_{1y}=10^\circ, R_{01}=10 \text{ km}, R_{02}=400 \text{ km}, SWH=9 \text{ m}, \Delta f=6 \text{ MHz}$
- . - $\delta_{1x}=\delta_{1y}=10^\circ, R_{01}=1 \text{ km}, R_{02}=10 \text{ km}, SWH=9 \text{ m}, \Delta f=6 \text{ MHz}$
- $\delta_{1x}=\delta_{1y}=10^\circ, R_{01}=1 \text{ km}, R_{02}=400 \text{ km}, SWH=9 \text{ m}, \Delta f=6 \text{ MHz}$
- - - $\delta_{1x}=\delta_{1y}=10^\circ, R_{01}=400 \text{ km}, R_{02}=1 \text{ km}, SWH=9 \text{ m}, \Delta f=6 \text{ MHz}$
- $\delta_{1x}=\delta_{1y}=10^\circ, R_{01}=400 \text{ km}, R_{02}=10 \text{ km}, SWH=9 \text{ m}, \Delta f=6 \text{ MHz}$

При дальности до передатчика (или приемника) до 10 км можно использовать передающую (или приемную) антенну с диаграммой направленности 10 градусов без ограничения приемной (или передающей) антенны.



Ку-диапазон



Выводы

- Бистатическая схема измерения с приемником (или излучателем), расположенным в космосе, позволяет измерять значительную высоту волны на основе измерения функции взаимной корреляции двух отраженных сигналов, близких по частоте.
- Когда приемник и излучатель находятся на спутниковых орбитах, SCC практически нечувствителен к SWH.
- Если приемник или излучатель расположены на небольшой высоте (до 10 км), то зависимость SCC от SWH будет такой, как будто оба расположены на небольшой высоте.
- Если излучатель расположен на небольшой высоте, то SCC не зависит от высоты и антенны приемника. Аналогично, если приемник расположен на небольшой высоте, то ККС не зависит от высоты и антенны излучателя.

