



Институт прикладной физики РАН

Сравнение доплеровских спектров сигналов в Ka-, Ku- и L-диапазонах, отраженных морским льдом и поверхностным волнением, полученных в результате полуэмпирического моделирования

Титченко Ю.А., Ковалдов Д.А., Караев В.Ю.

Нижний Новгород

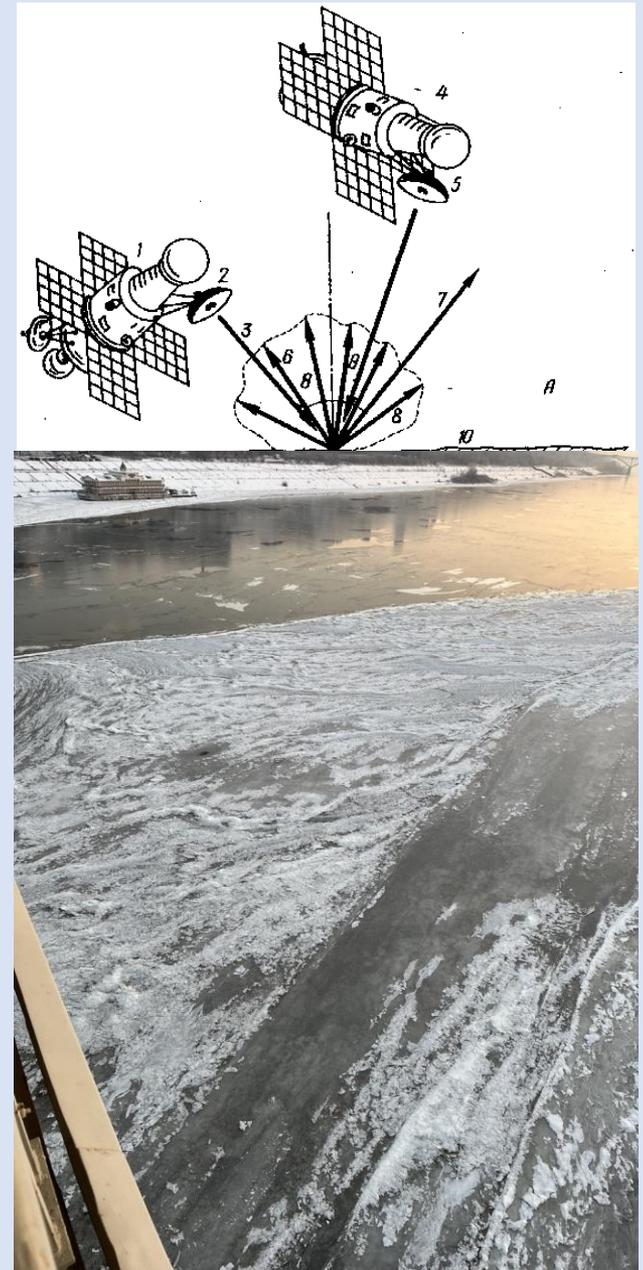
Актуальность

Проблемы:

- Постоянный и глобальный мониторинг ледяного покрова становится особенно важным в связи с ускорением глобального изменения климата.
- В настоящее время не существует теоретической модели для микроволнового зеркального отражения от ледяного покрова.

Цель данной работы

- Построение полуэмпирической модели доплеровского спектра микроволнового сигнала, бистатически отраженного ледяным покровом.
- Модель работает в квазизеркальной области отражения. Модель позволяет изменять углы скольжения осей диаграмм направленности передающей и приемной антенн, скорость перемещения и высоту расположения над отражающей поверхностью приемника и передатчика. Также можно задавать диаграммы направленности передающей и приемной антенн, причем эти диаграммы могут быть несимметричными.
- Для сравнения рассматривается L-, Ku- и Ka- диапазоны. Показано, что для определения типа подстилающей поверхности (лед или морская поверхность) можно анализировать коэффициент эксцесса и ширину доплеровского спектра бистатически отраженного сигнала..
- В исследовании используются экспериментальные данные полученные со спутников GPM и TDS-1.



Бистатика

Преимуществом бистатического дистанционного зондирования:

1) Возможность проводить измерения в удаленной от приемника и излучателя области

2) Рассеяние в квазизеркальной области открывает возможности:

Получить связь характеристик рассеяния с параметрами водной поверхности;

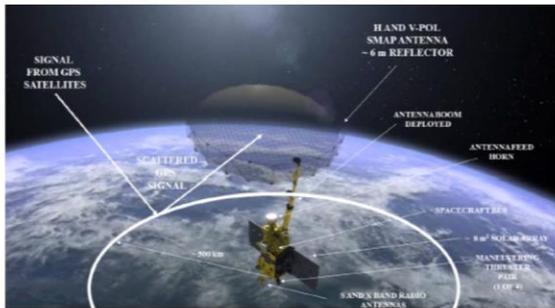
Создания новых алгоритмов решения обратной задачи;

Уровень мощности принимаемого сигнала в квазизеркальной области отражения значительно превосходит область резонансного рассеяния

3) Возможность использования существующих источников сигналов, таких как сигналы GNSS.

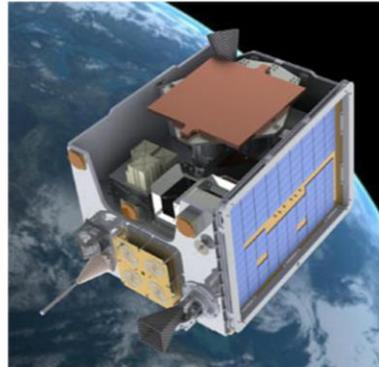
Бистатистические измерения из космоса

SMAP



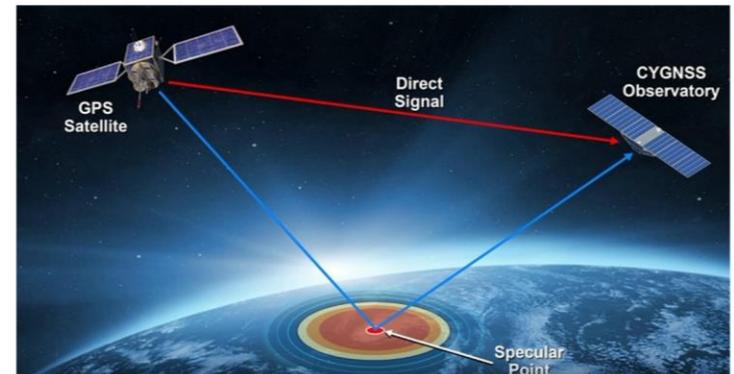
[Carreno-Luengo et al., GNSS+R 2017]

TechDemoSat 1



[SSTL]

CYGNSS

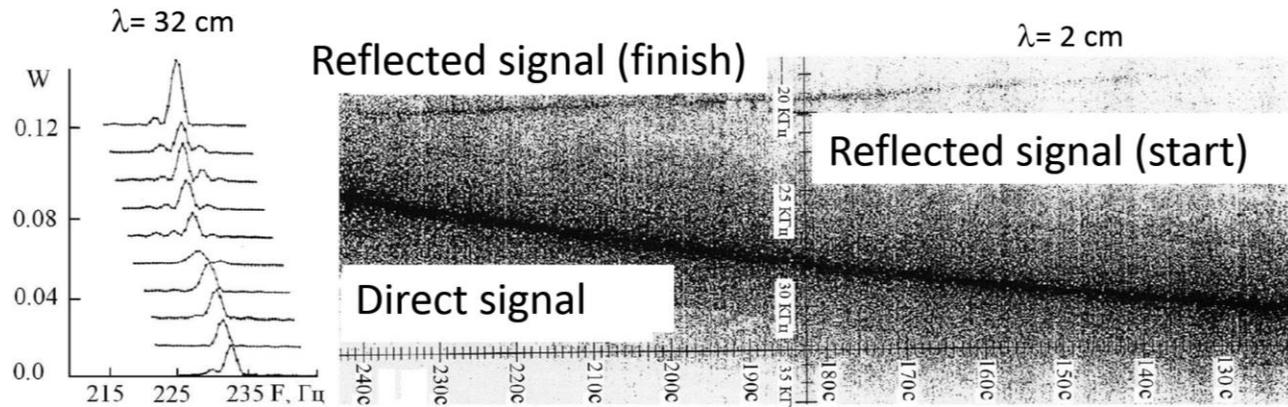


[Ruf, 2017 AMS Annual, CYGNSS Mission]

MIR orbital station - geostationary satellite



Indian Ocean and Aral Sea, May 28, 1998



[Potemkin et al., Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2012]

Метод моделирования доплеровского спектра

Для каждой точки засвечиваемой области проекция относительной скорости будет:

$$V_r(x, y) = -V_{1x} \cos \psi_1 \cos \varphi_1 - V_{2x} \cos \psi_2 \cos \varphi_2.$$

Для нахождения доплеровского спектра (ДС)

$$f(x, y) = V_r(x, y) / \lambda.$$

А амплитуду ДС будем считать:

$$S(f(x, y)) = \left| R^{ii}(x, y) \right|^2 G_1^2(x, y) G_2^2(x, y) \times 10^{RCS(\theta(x, y))/10}$$

где угол $\theta = (\psi_1 - \psi_2) / 2$, буквы ii у коэффициента Френеля означают излучаемую (первая i) и принимаемую (вторая $i=H, V, R, L$) поляризации (Zavorotny, Voronovich, 2000):

$$R^{HH} = \frac{\sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}}}{\sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}}},$$

$$R^{VV} = \frac{\varepsilon \sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}}}{\varepsilon \sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}}},$$

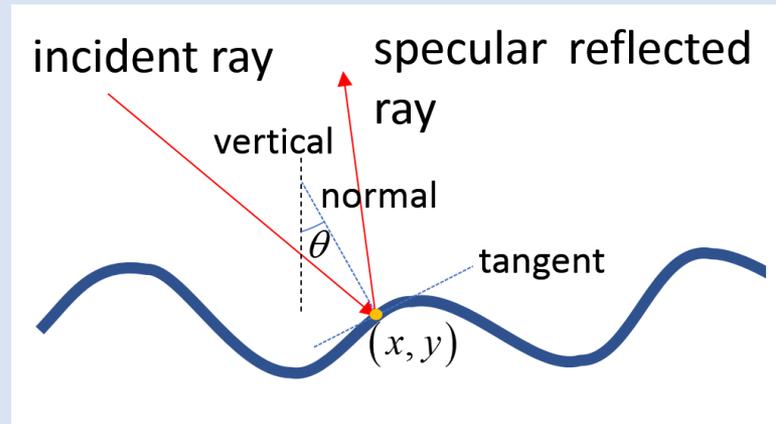
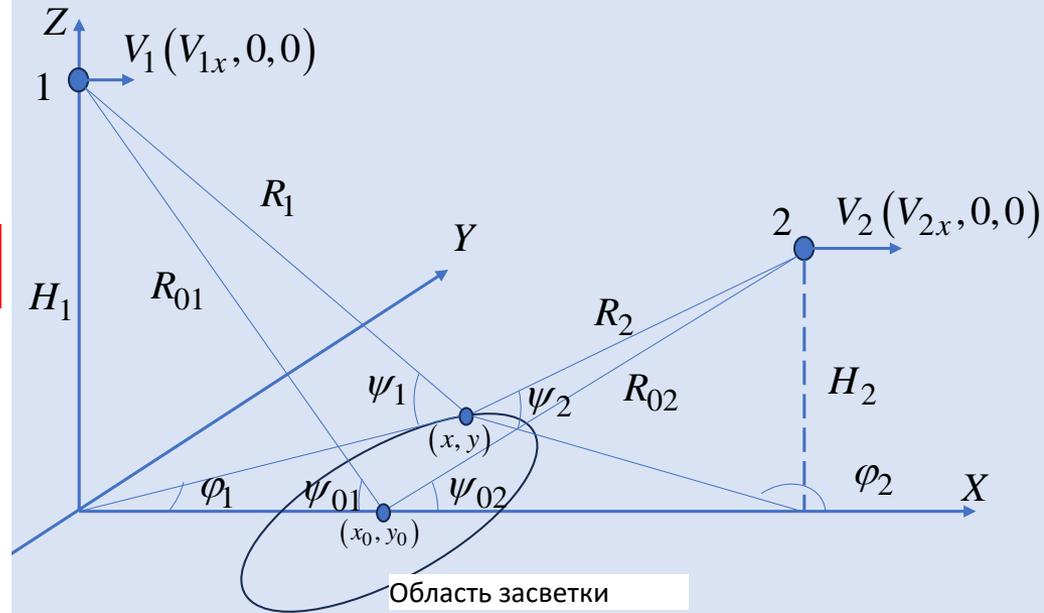
$$R^{RR} = R^{LL} = \frac{1}{2}(R^{VV} + R^{HH}), \quad R^{RL} = R^{LR} = \frac{1}{2}(R^{VV} - R^{HH})$$

Диаграммы направленности (ДН):

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

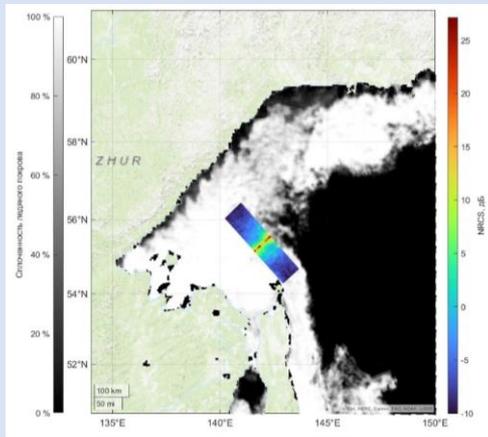
$$G_2(x, y) = \exp \left\{ -1,38 \frac{\sin^2 \chi}{R_{02}^2 \delta_{2x}^2} x^2 - 1,38 \frac{y^2}{R_{02}^2 \delta_{2y}^2} \right\},$$

где δ_{1x} и δ_{1y} - ширины ДН излучающей антенны, δ_{2x} и δ_{2y} ширины ДН приемной антенны.

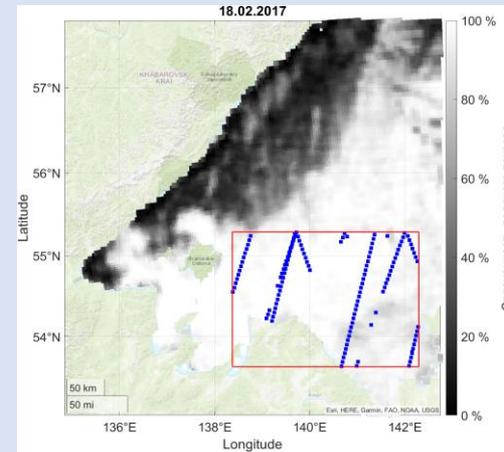


Экспериментальные данные

Лёд



GPM
Ku-диапазон

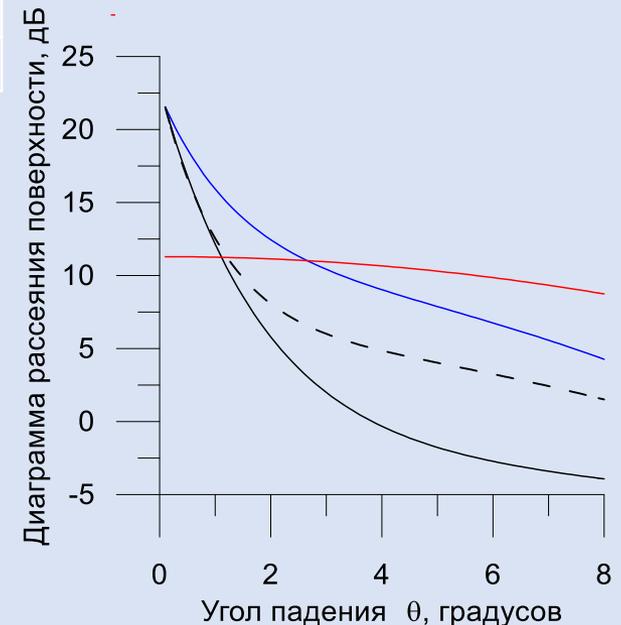


TDS-1
L-диапазон

$$RCS_{ice}(\theta) = a_{ice} + b_{ice} \theta + c_{ice} \theta^2 + d_{ice} \exp(-e_{ice} |\theta|)$$

	a_{ice}	b_{ice}	c_{ice}	d_{ice}	e_{ice}
Ku	-3,151789	-0,008708	-0,016928	26,01349	0,528842
Ka	-0.87215	-4.72E-08	-0.05945	17.72354	0.887818
L	33,15263	1,52E-08	-0,08342	12,86333	0,690166

- — — — — Ледяной покров для Ку-диапазона
- - - - - Ледяной покров для Ка-диапазона
- — — — — Ледяной покров для L-диапазона
- — — — — Морская поверхность для Ку-диапазона



GPM, Вода

$$RCS_{sea}(\theta) = a_{sea} + b_{sea} \theta + c_{sea} \theta^2 + d_{sea} \theta^3 + e_{sea} \theta^4 + f_{sea} \theta^5,$$

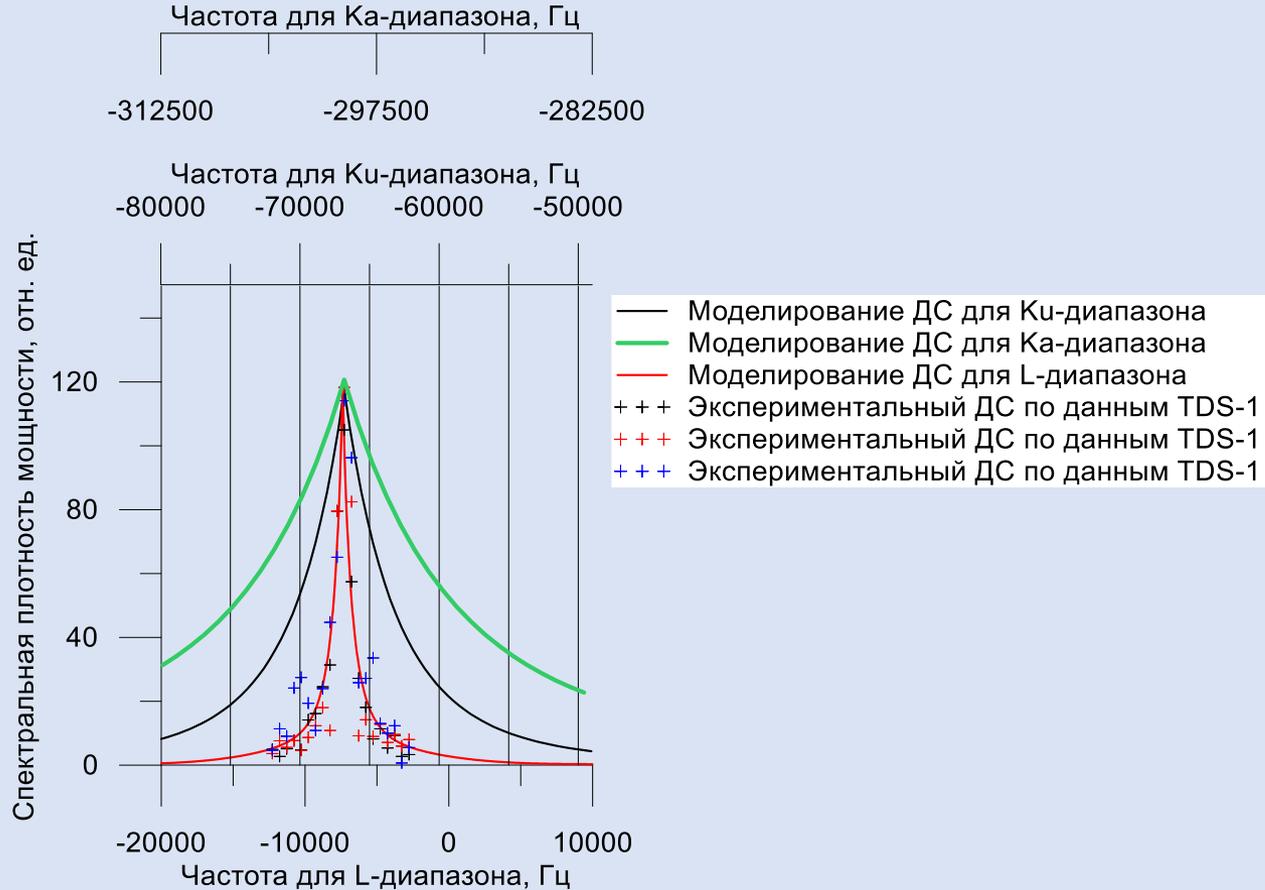
где $a_{sea} = 11,291178$, $b_{sea} = 0,0062640913$, $c_{sea} = -0,04076229$,

$d_{sea} = -0,00010407121$,

$e_{sea} = 1,3805852 \cdot 10^{-5}$, $f_{sea} = 7,9111159 \cdot 10^{-8}$.

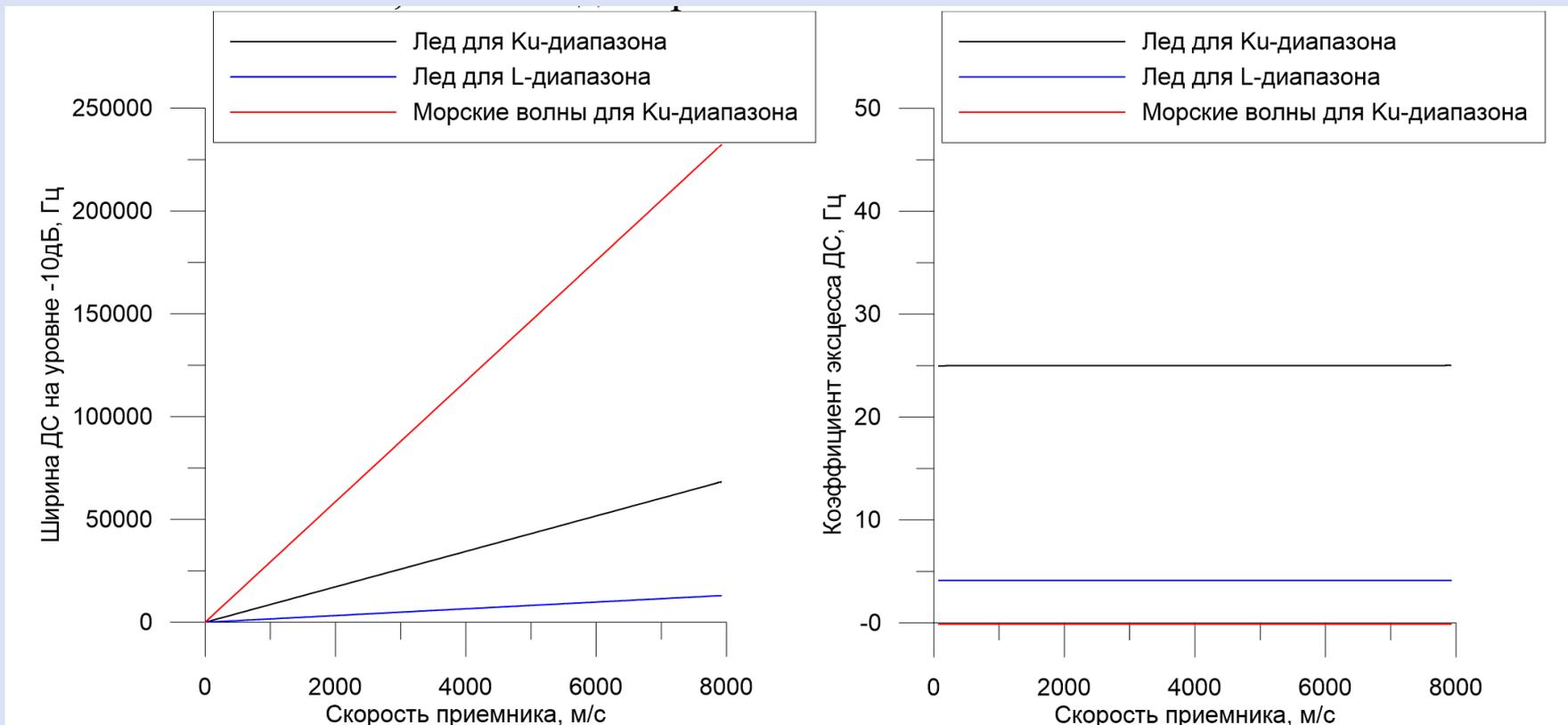
Моделирование доплеровского спектра (ДС)

Случай приема отраженных навигационных сигналов на низкой околоземной орбите



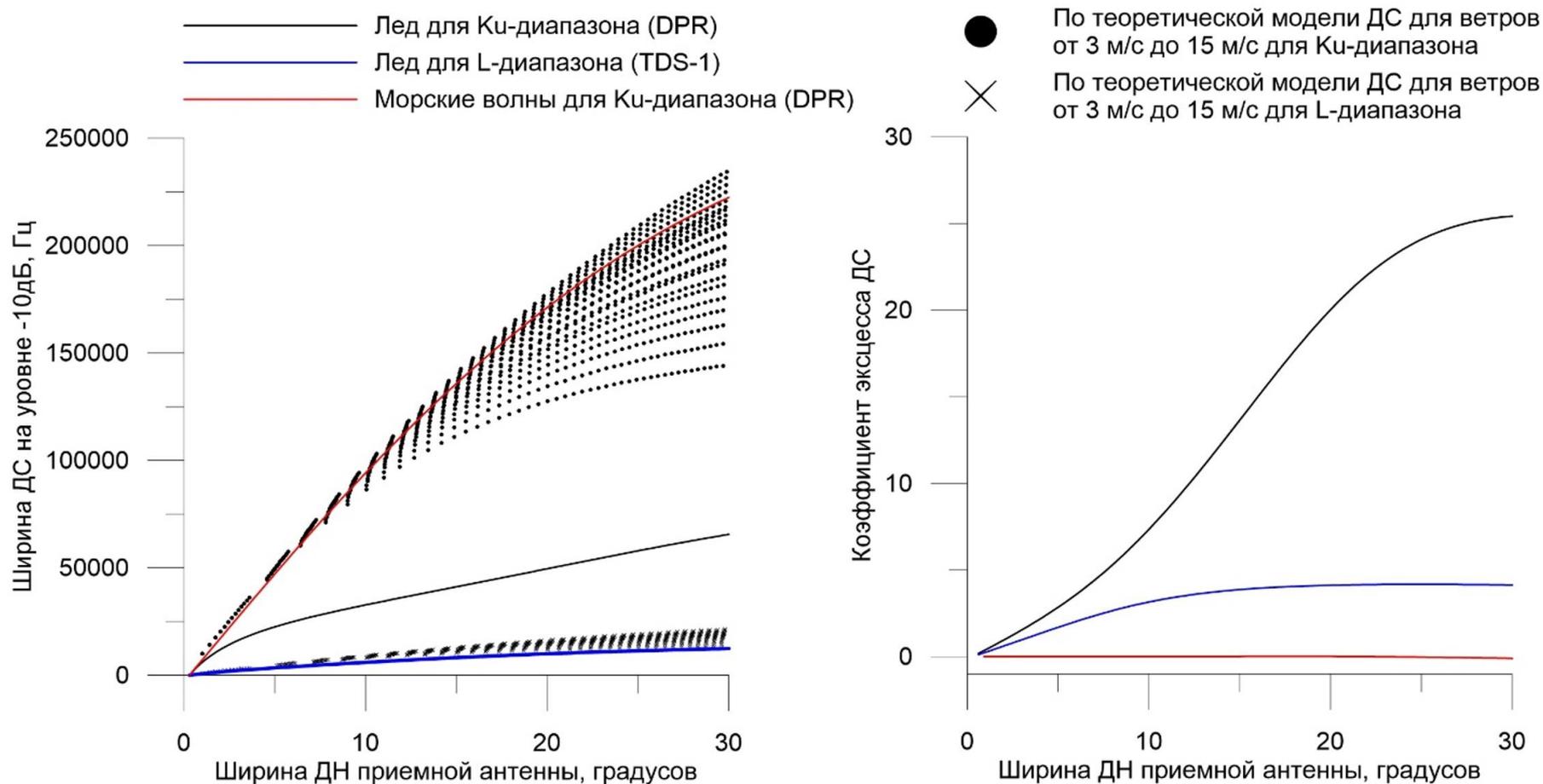
ДН принимающей антенны 30 градусов. Углы скольжения излучающей и приемной антенны 60,7 градусов. Расстояние от излучателя до центра диаграммы направленности 21055 км. Расстояние от приемника до центра диаграммы направленности 731 км. Модуль скорости приемника 7,6 км/с. Модуль скорости излучателя 2,7 км/с.

Зависимости ДС отраженного сигнала



ДН принимающей и излучающей антенны 30 градусов. Углы скольжения излучающей и приемной антенны 60 градусов. Скорость излучателя 3 км/с. Излучатель находится на орбите 20000 км. От высоты орбиты приемника результат практически не зависит, но она задана равной 500 км.

Зависимости ДС отраженного сигнала

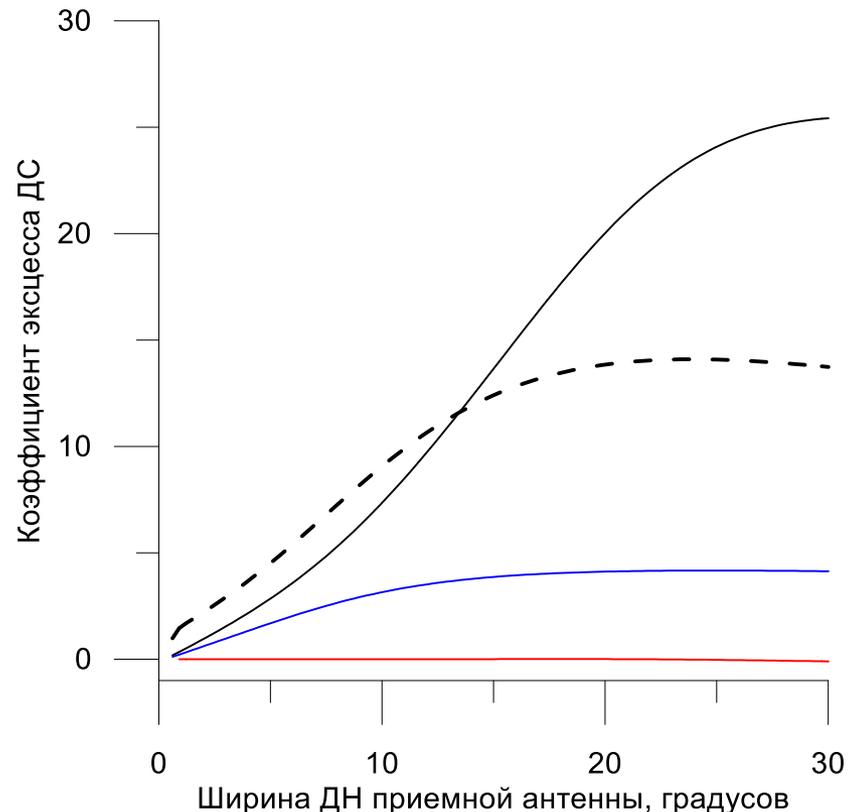
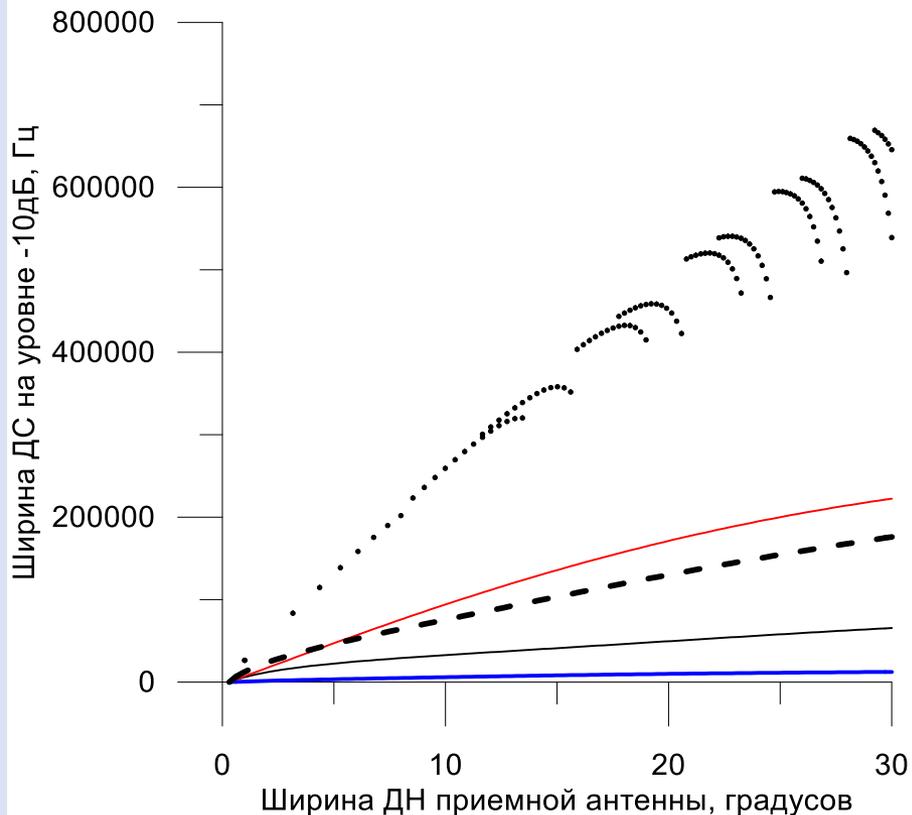


Углы скольжения излучающей и приемной антенны 60 градусов. Скорость излучателя 3 км/с. Скорость приемника 7,6 км/с. Излучатель располагается на орбите 20000 км, приемник на 500 км.

Зависимости ДС отраженного сигнала

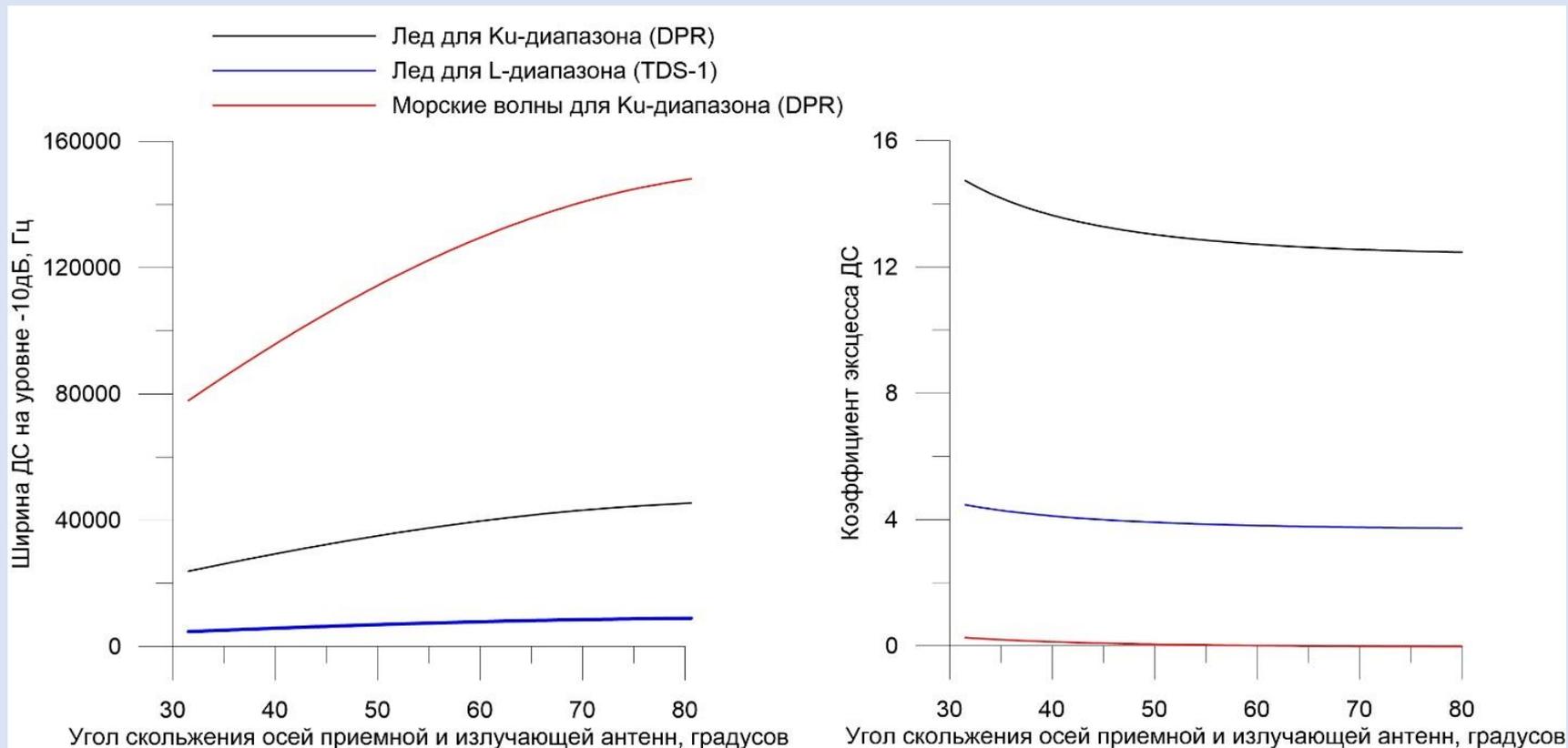
- Лед для Ku-диапазона (DPR)
- - - Лед для Ka-диапазона (DPR)
- Лед для L-диапазона (TDS-1)
- Морские волны для Ku-диапазона (DPR)

- По теоретической модели ДС для ветров от 3 м/с до 15 м/с для Ka-диапазона
- × По теоретической модели ДС для ветров от 3 м/с до 15 м/с для L-диапазона



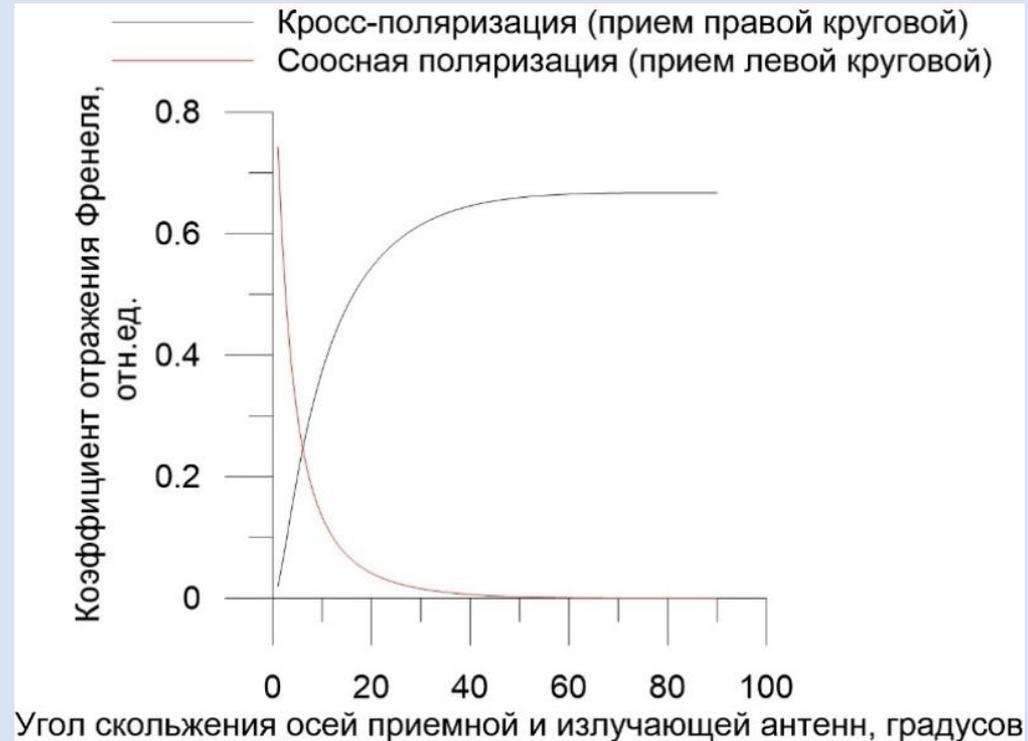
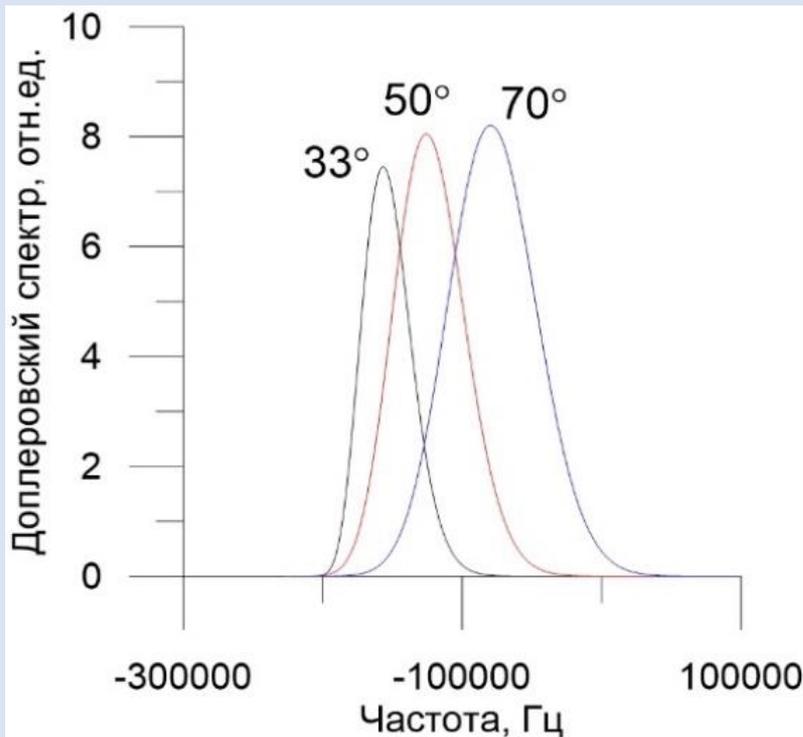
Углы скольжения излучающей и приемной антенны 60 градусов. Скорость излучателя 3 км/с. Скорость приемника 7,6 км/с. Излучатель располагается на орбите 20000 км, приемник на 500 км.

Зависимости ДС отраженного сигнала



Излучатель располагается на орбите 20000 км, приемник на 500 км. ДН принимающей антенны 14 градусов, излучающей 30 градусов. Скорость излучателя 3 км/с. Скорость приемника 7,6 км/с.

ДС отраженного сигнала и коэффициент Френеля



Излучатель располагается на орбите 20000 км, приемник на 500 км. ДН принимающей антенны 14 градусов, излучающей 30 градусов. Скорость излучателя 3 км/с. Скорость приемника 7,6 км/с.

Выводы

- Предложен вариант моделирования ДС отраженного ледяным покровом сигнала с использованием эмпирической ДР ледяного покрова для конкретного частотного диапазона.
- Впервые смоделированы ДС отраженного ледяным покровом сигнала в бистатической постановке задачи для L-диапазона. Результат моделирования сравнивается с экспериментально измеренными ДС отраженного сигнала на спутнике TDS-1.
- Проведено исследование ширины и КЭ ДС отраженного сигнала в зависимости от скорости, ширины и угла скольжения оси ДН антенны приемника. В результате исследования показано, что при широкой ДН антенны приемника можно определять наличие ледяного покрова по КЭ ДС отраженного сигнала. Причем в случае слабого волнения КЭ может являться даже более надежным индикатором типа поверхности, чем ширина ДС. Важным плюсом такого подхода является анализ только формы ДС отраженного сигнала, без необходимости калибровки мощностных характеристик.
- Дальнейшим направлением исследований в данной области будет оценка возможности определения других параметров ледяного покрова (например, сплоченность, соленость, температура ледяного покрова) по измерениям различных параметров ДС двухпозиционным радаром с использованием сигналов ГНСС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>.