

Многолучевое распространение сигналов СРНС (лабораторная работа)

Введение

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) и их приложения в современном мире играют огромную роль: они способствуют развитию экономики, улучшают условия жизни людей, укрепляют оборону страны. Развитие навигационных технологий не останавливается: совершенствуются и космический, и наземный, и потребительский сегменты. Одна из существующих задач – повышение точности навигационных определений, одна из существующих проблем на этом пути – многолучевое распространение сигналов. Данная проблема особо остро стоит при применении навигационной аппаратуры потребителей (НАП) в условиях городской застройки, в составе военных комплексов (бронетехника, суда), как при кодовых, так и при фазовых измерениях.

Для борьбы с влиянием многолучевого распространения необходимо изучить характер этого влияния. Антенну, радиочастотный блок и корреляторы навигационного приемника можно считать, в некотором приближении, линейными устройствами. Прохождение через них навигационного сигнала хорошо изучено. Для составления адекватной модели процессов в этих элементах приемника достаточно определить запаздывание, ослабление и фазовый сдвиг отраженного сигнала относительно прямого. Тогда в качестве модели процессов можно принять суперпозицию откликов на прямой и отраженный сигнал.

В настоящей лабораторной работе студентам предлагается развить свои представления о многолучевом распространении сигнала и его влиянии на приемник на предельно простом, но практически ценном модельном примере: приеме сигналов неподвижным приемником в условиях переотражения от вертикального экрана конечных размеров, расположенном на некотором расстоянии от приемной антенны.

Лабораторный практикум включает в себя:

- ознакомление с математической моделью совокупности сигналов при многолучевом распространении;
- самостоятельный численный расчет характеристик многолучевого распространения с помощью приведенной математической модели;
- моделирование многолучевого распространения сигнала СРНС в программе, созданной в среде Matlab;
- обработку и сравнение полученных результатов.

Модель многолучевого распространения сигналов и его влияния на сигналы на выходе коррелятора

Проведем логические рассуждения, на основе которых получим математические модели многолучевого распространения и сигналов коррелятора.

Исходные данные

Опишем Землю, отражающий экран, фазовый центр антенны навигационного спутника и фазовый центр приемной антенны НАП как сферу, ограниченный прямоугольником участок плоскости и две точки в трехмерном пространстве соответственно (см. рисунок 1).

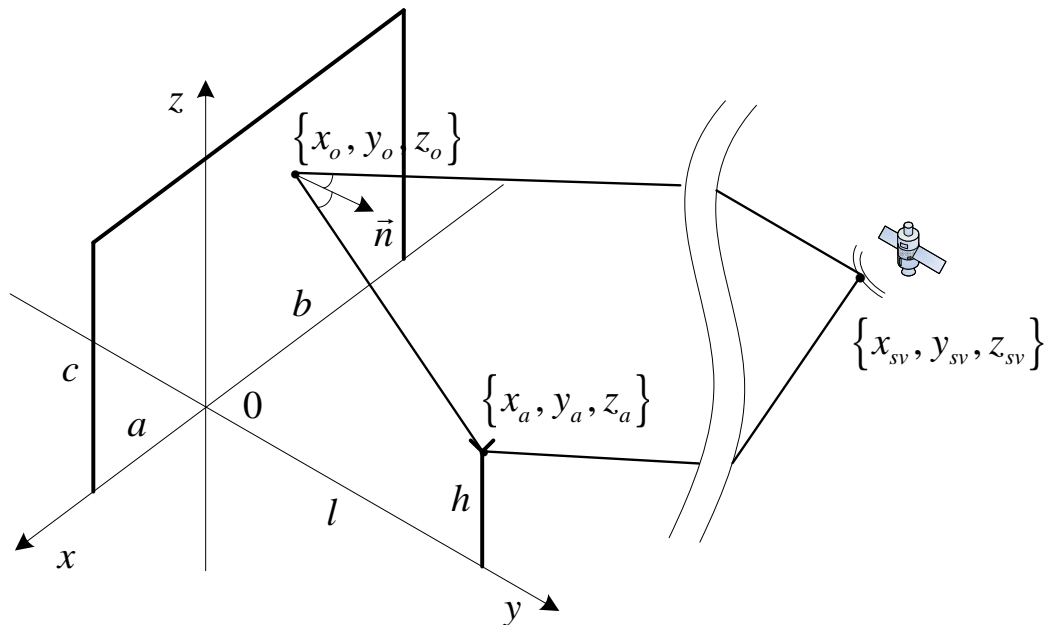


Рис. 1 Многолучевое распространение сигнала с отражением от экрана конечных размеров

Для этого зададим две декартовы системы координат:

- СК $x_E y_E z_E O_E$, связанная с центром Земли (сферы);
- СК $x y z O$, связанная с СК $x_E y_E z_E O_E$ преобразованием:

$$x = x_E; \quad y = y_E; \quad z = z_E - R_E, \quad (1)$$

где R_E - средний радиус Земли, равный 6 371 км.

Пусть, известна высота экрана $c \ll R_E$ и его ширина $(a+b) \ll R_E$. Тогда, в СК $x y z O$ плоскость отражающего экрана описывается уравнением $y=0$, а его точки удовлетворяют соотношениям:

$$y = 0; \quad a \geq x \geq b; \quad c \geq z \geq 0. \quad (2)$$

Пусть, на некотором расстоянии $l \ll R_E$ от экрана, значительно меньшем радиуса Земли, расположена приемная антенна, поднятая над поверхностью на высоту h . Тогда, в качестве модели фазового центра антенны в СК $x y z O$ выступает точка $\{x_a, y_a, z_a\}$ или её радиус-вектор \vec{r}_a , где

$$x_a = 0; \quad y_a = l; \quad z_a = h. \quad (3)$$

Моделью фазового центра передающей антенны спутника выступает точка $\{x_{sv}(t), y_{sv}(t), z_{sv}(t)\}$ (или её радиус-вектор \vec{r}_{sv}), движущаяся вокруг центра СК $x_E y_E z_E O_E$ по соответствующему закону.

Если существует переотражённый от экрана сигнал, то точка его отражения имеет координаты $\{x_o(t), y_o(t), z_o(t)\}$ (радиус-вектор \vec{r}_o).

Центр сферы расположен в точке $(0;0;0)$ в СК $x_E y_E z_E O_E$, радиус сферы - R_E .

Рассматриваемая модель рассматривает отражение сигнала только от вертикального экрана. Сигналы, отражённые от поверхности земли, достаточно хорошо подавляются специализированными антеннами.

Модель многолучевого распространения

Поиск координат точки отражения

Примем гипотезу зеркального отражения от экрана. Тогда, угол падения сигнала равен углу его отражения:

$$\frac{(\vec{r}_a - \vec{r}_o) \cdot \vec{n}}{\|\vec{r}_a - \vec{r}_o\|} = \frac{(\vec{r}_{sv} - \vec{r}_o) \cdot \vec{n}}{\|\vec{r}_{sv} - \vec{r}_o\|}, \quad (4)$$

где $\vec{n} = (0; 1; 0)$ - вектор нормали к экрану.

Введем векторы

$$\begin{aligned} \vec{r}_{ao} &= \vec{r}_a - \vec{r}_o; \\ \vec{r}_{svo} &= \vec{r}_{sv} - \vec{r}_o, \end{aligned} \quad (5)$$

тогда выражение (4) преобразуется к виду

$$\vec{r}_{ao} \cdot \vec{n} \cdot \|\vec{r}_{svo}\| = \vec{r}_{svo} \cdot \vec{n} \cdot \|\vec{r}_{ao}\|, \quad (6)$$

что в виду введенного определения \vec{n} приводит к выражению

$$y_a = y_{sv} \cdot \frac{\|\vec{r}_{ao}\|}{\|\vec{r}_{svo}\|}. \quad (7)$$

откуда следует

$$y_a^2 \left(\frac{\|\vec{r}_{svo}\|^2}{y_{sv}^2} - 1 \right) = (x_a - x_o)^2 + (z_a - z_o)^2. \quad (8)$$

Нормаль, падающий луч и отраженный луч лежат в одной плоскости:

$$\frac{\vec{r}_{svo}}{\|\vec{r}_{svo}\|} + \frac{\vec{r}_{ao}}{\|\vec{r}_{ao}\|} = \alpha \cdot \vec{n} = (0; \alpha; 0), \quad (9)$$

что для компонент x и z вырождается в выражения:

$$\frac{x_{sv} - x_o}{x_a - x_o} = -\frac{\|\vec{r}_{svo}\|}{\|\vec{r}_{ao}\|}; \quad \frac{z_{sv} - z_o}{z_a - z_o} = -\frac{\|\vec{r}_{svo}\|}{\|\vec{r}_{ao}\|}, \quad (10)$$

откуда

$$x_o = \frac{x_{sv} + x_a \frac{\|\vec{r}_{svo}\|}{\|\vec{r}_{ao}\|}}{1 + \frac{\|\vec{r}_{svo}\|}{\|\vec{r}_{ao}\|}}; \quad z_o = \frac{z_{sv} + z_a \frac{\|\vec{r}_{svo}\|}{\|\vec{r}_{ao}\|}}{1 + \frac{\|\vec{r}_{svo}\|}{\|\vec{r}_{ao}\|}}. \quad (11)$$

Воспользовавшись теоремой Пифагора для уравнения (8), получаем:

$$y_a^2 \left(\frac{\|\vec{r}_{sv}\|^2}{y_{sv}^2} - 1 \right) + y_a^2 = \|\vec{r}_{ao}\|^2, \quad (12)$$

тогда

$$\frac{\|\vec{r}_{sv}\|}{\|\vec{r}_{ao}\|} = \left| \frac{y_{sv}}{y_a} \right|. \quad (13)$$

Подставляя выражение (13) в (11), получаем координаты точки отражения на бесконечном экране:

$$x_o = \frac{x_{sv} + x_a \left| \frac{y_{sv}}{y_a} \right|}{1 + \left| \frac{y_{sv}}{y_a} \right|}; \quad y_o = 0; \quad z_o = \frac{z_{sv} + z_a \left| \frac{y_{sv}}{y_a} \right|}{1 + \left| \frac{y_{sv}}{y_a} \right|}. \quad (14)$$

Условия наличия прямого и отраженного сигналов

Чтобы присутствовал отраженный сигнал, при просмотре из точки отражения спутник должен находиться над горизонтом и при этом выполняться неравенство $y_{sv} > 0$.

Определим условия видимости спутника из точки отражения (см. рисунок 2).

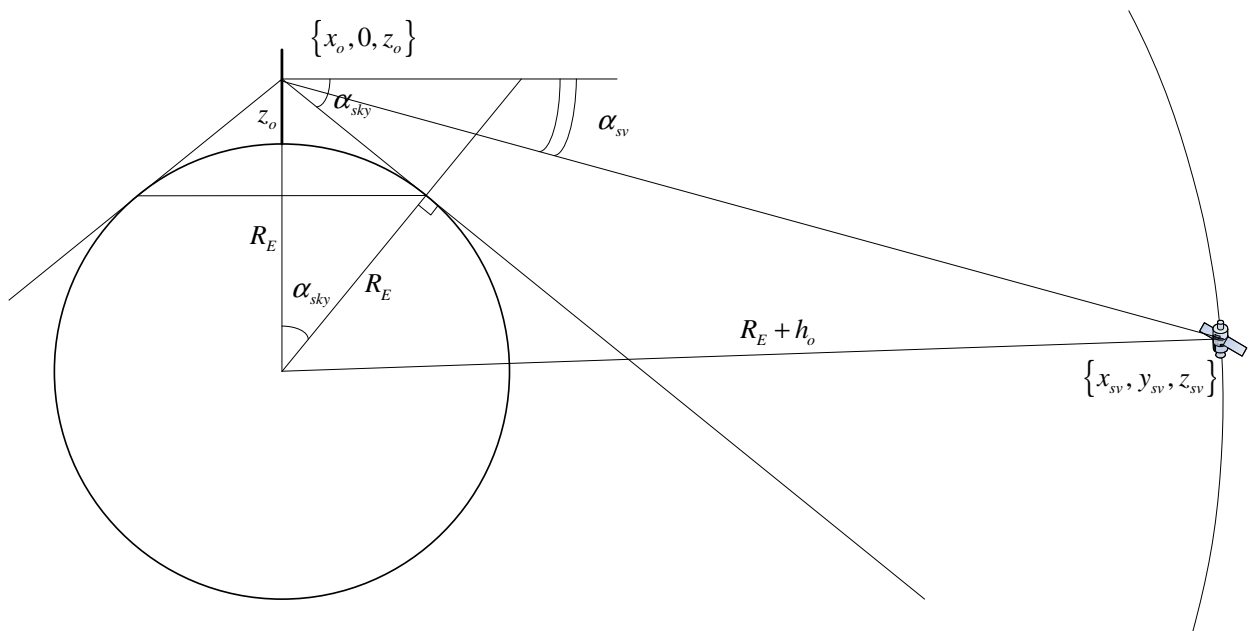


Рис. 2 Срез в плоскости точка отражения – спутник – центр Земли

Тангенс угла места, под которым из точки отражения виден горизонт:

$$tg(\alpha_{sky}) = -\frac{\sqrt{2R_E z_o + z_o^2}}{R_E} \quad (15)$$

тангенс угла места, под которым спутник виден из точки отражения:

$$tg(\alpha_{sv}) = \frac{z_{sv} - z_o}{\sqrt{(x_{sv} - x_o)^2 + (y_{sv} - y_o)^2}}. \quad (16)$$

Условие нахождения спутника над горизонтом для точки отражения:

$$tg(\alpha_{sv}) > tg(\alpha_{sky}). \quad (17)$$

По аналогии найдем критерий наличия прямого сигнала. При возвышении спутника над горизонтом, при наблюдениях из точки фазового центра приемной антенны, выполняется неравенство:

$$tg(\alpha_{sv}^a) > tg(\alpha_{sky}^a), \quad (18)$$

где

$$tg(\alpha_{sky}^a) = -\frac{\sqrt{2R_E h + h^2}}{R_E}, \quad (19)$$

$$tg(\alpha_{sv}^a) = \frac{z_{sv} - z_a}{\sqrt{(x_{sv} - x_a)^2 + (y_{sv} - y_a)^2}}. \quad (20)$$

Когда спутник находится в полуплоскости $y_{sv} < 0$, его сигнал может быть затенен экраном. Точки прямой спутник – приемная антенна удовлетворяют уравнению:

$$\frac{x - x_a}{x_{sv} - x_a} = \frac{y - y_a}{y_{sv} - y_a} = \frac{z - z_a}{z_{sv} - z_a} \quad (21)$$

Тогда точка пересечения прямого луча с экраном имеет координаты:

$$x_p = x_a - \frac{y_a(x_{sv} - x_a)}{y_{sv} - y_a}; \quad (22)$$

$$z_p = z_a - \frac{y_a(z_{sv} - z_a)}{y_{sv} - y_a}.$$

С учетом (2) получаем условие затенения экраном прямого сигнала спутника

$$a \geq x_p \geq -b; \quad c \geq z_p \geq 0; \quad y_{sv} < 0. \quad (23)$$

Тогда, для наличия прямого сигнала спутника должно выполняться соотношение (18) и не выполняться соотношения (23).

Координаты спутника

Опишем координаты спутника $\{x_{sv}(t), y_{sv}(t), z_{sv}(t)\}$ как функцию времени. Пусть, спутник движется по круговой орбите на высоте h_o над средним уровнем Земли. Пусть, в начальный момент времени долгота восходящего узла составляет Ω_0 , наклонение орбиты i_0 , угол начального положения на орбите θ_0 , тогда в СК $x_E y_E z_E O_E$ координаты спутника (см. рисунок 3) задаются выражением([1]):

$$x_{E,sv} = (R_E + h_o) \cdot \left[\cos(\theta_0 + 2\pi f_{sv} t) \cos(\Omega_0 + 2\pi f_E t) - \sin(\theta_0 + 2\pi f_{sv} t) \sin(\Omega_0 + 2\pi f_E t) \cos(i_0) \right],$$

$$y_{E,sv} = (R_E + h_o) \cdot \left[\cos(\theta_0 + 2\pi f_{sv} t) \sin(\Omega_0 + 2\pi f_E t) + \sin(\theta_0 + 2\pi f_{sv} t) \cos(\Omega_0 + 2\pi f_E t) \cos(i_0) \right],$$

$$z_{E,sv} = (R_E + h_o) \cdot \sin(\theta_0 + 2\pi f_{sv} t) \cdot \cos(i_0), \quad (24)$$

где f_E - частота вращения Земли (около $1.16 \cdot 10^{-5}$ Гц), f_{sv} - частота вращения спутника (в

зависимости от системы около $2.5 \cdot 10^{-5}$ Гц). Переход от координат СК $x_E y_E z_E O_E$ к координатам СК $x y z O$ осуществляется с помощью преобразований (1).



Рис. 3 Ориентация орбитальной плоскости

Разность хода прямого и отраженного лучей

Разность хода прямого и отраженного лучей можно после проведенных выкладок можно найти множеством способов, например прямым:

$$\Delta_R = \sqrt{x_{sv}^2 + (y_{sv} - y_a)^2 + (z_{sv} - z_a)^2} - \sqrt{x_o^2 + y_a^2 + (z_o - z_a)^2} - \sqrt{(x_o - x_{sv})^2 + y_{sv}^2 + (z_o - z_{sv})^2}. \quad (25)$$

Модель выходного сигнала коррелятора при действии на входе приемника прямого и отраженного сигналов

Антенный модуль, фронтенд и коррелятор в отсутствии помех можно считать линейными устройствами. Тогда сигнал на выходе коррелятора при действии на входе антенны прямого и отраженного лучей можно представить как сумму реакций на прямой и отраженный сигнал.

При действии на выходе антенного модуля одного навигационного сигнала, выходной k-й отсчет коррелятора можно приближенно описать выражениями:

$$\begin{aligned} I_k &= A_{IQ,k} \cos(\delta\Phi_k) + n_I \sigma_{IQ,k}, \\ Q_k &= -A_{IQ,k} \sin(\delta\Phi_k) + n_Q \sigma_{IQ,k}, \end{aligned} \quad (26)$$

где

$$A_{IQ,k} = \frac{A_k L}{2} \text{sinc}\left(\frac{(\omega_{d,k} - \tilde{\omega}_{d,k})T}{2}\right) \rho(\tau_k - \tilde{\tau}_k) \quad (27)$$

$$\sigma_{IQ,k}^2 = \sigma_{n,k}^2 L/2, \quad (28)$$

$$\delta\Phi_k = \text{mod}\left(\frac{(\omega_{d,k} - \tilde{\omega}_{d,k})T}{2} + \varphi_k + \theta_k \pi, 2\pi\right) \quad (29)$$

где A_k - амплитуда навигационного сигнала на входе АЦП, $\sigma_{n,k}^2$ - дисперсия шума на входе АЦП, L - число тактов АЦП участвующих в накоплении в корреляторе, $\tau_k, \tilde{\tau}_k$ - задержка дальномерного кода сигнала спутника и опорного сигнала коррелятора, $\omega_{d,k}, \tilde{\omega}_{d,k}$ - циклическая частота сигнала спутника и опорного сигнала коррелятора, φ_k - начальная фаза навигационного сигнала на k-ом

интервале, $\rho(x)$ - корреляционная функция дальномерного кода, n_I, n_Q - некоррелированные белые гауссовские шумы.

Темп изменения коэффициента отражения, угла прихода отраженного сигнала и т.п. значительно меньше темпа изменения фазовых соотношений между прямым и отраженным сигналом. Если не учитывать сдвиг фазы при отражении, фазовую характеристику антенны, сигнал на выходе коррелятора при многолучевом распространении можно описать выражениями

$$\begin{aligned} I_k &= A_{IQ,k} \left[\cos(\delta\Phi_k) + K_{MP,k} \cos\left(\delta\Phi_k + 2\pi \frac{\Delta_{R,k}}{\lambda}\right) \right] + n_I \sigma_{IQ,k}; \\ Q_k &= -A_{IQ,k} \left[\sin(\delta\Phi_k) + K_{MP,k} \sin\left(\delta\Phi_k + 2\pi \frac{\Delta_{R,k}}{\lambda}\right) \right] + n_Q \sigma_{IQ,k}, \end{aligned} \quad (30)$$

где λ - длина волны несущей навигационного сигнала, $K_{MP,k}$ - коэффициент ослабления отраженного сигнала относительно прямого на выходе антенны.

Для расчета коэффициента ослабления отраженного сигнала следует уточнить характер отражения от экрана и характеристики антенны.

Модель выходного сигнала коррелятора (30) можно графически представить как сложение двух векторов комплексных сигналов – прямого и отраженного (см. рисунок 4).

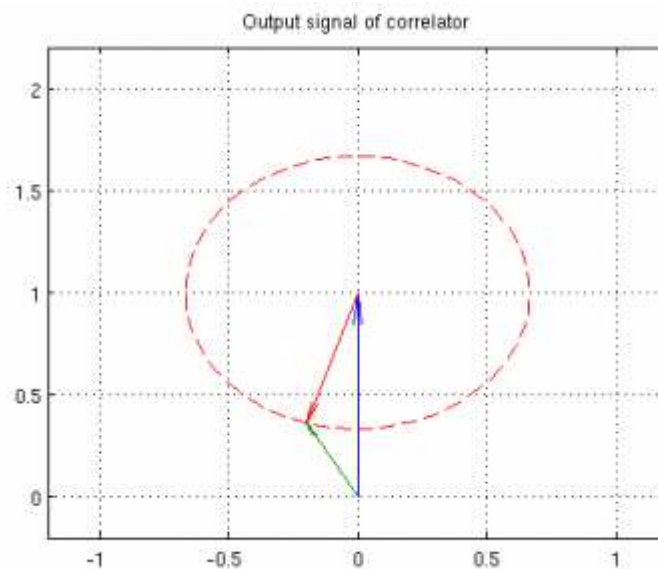


Рис. 4 Сложение векторов прямого и отраженного сигналов на комплексной плоскости

Воздействие отраженного сигнала приводит к фазовой и амплитудной модуляции суммарного сигнала - искажению корреляционной функции, меняющемуся во времени, см. рисунок 5.

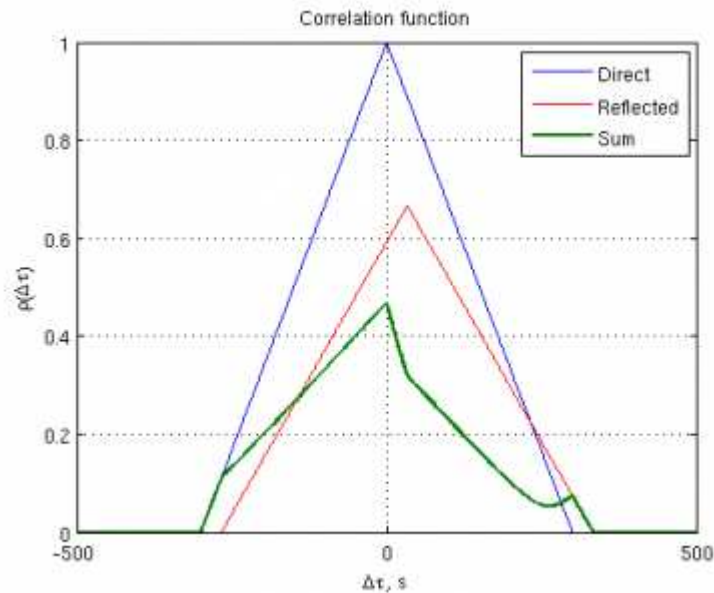


Рис. 5 Искажение корреляционной функции при действии отраженного сигнала

Домашняя подготовка

Перед выполнением работ в лаборатории, обучающиеся проводят предварительную подготовку. Результаты студентами предоставляются индивидуально на бумажных носителях до начала выполнения лабораторного задания.

В процессе подготовки требуется:

1. Получить у преподавателя индивидуальную таблицу параметров.
2. Изучить математическую модель многолучевого распространения сигналов и процессов на выходе коррелятора.
3. Построить график зависимости высоты орбиты спутника для параметров, заданных в индивидуальной таблице, и от 0 до 12 часов. Занести результат в отчет.
4. Для указанного момента времени определить разность хода прямого и отраженного лучей, ошибку, вносимую многолучевостью в фазу сигнала. Занести ход решения задачи (математические выкладки или код программы) и результат в отчет.

Выполнение работ в лаборатории

Описание программной модели

В лаборатории проводится моделирование многолучевого распространения сигнала с помощью программы, написанной в среде Matlab. Для выполнения скрипта следует запустить Matlab, перейти в соответствующую директорию и открыть файл main.m. Для запуска модели следует нажать клавишу клавиатуры F5 или кнопку Run в графическом интерфейсе Matlab'a, после чего открывается графический интерфейс программы (см. рисунок 6).

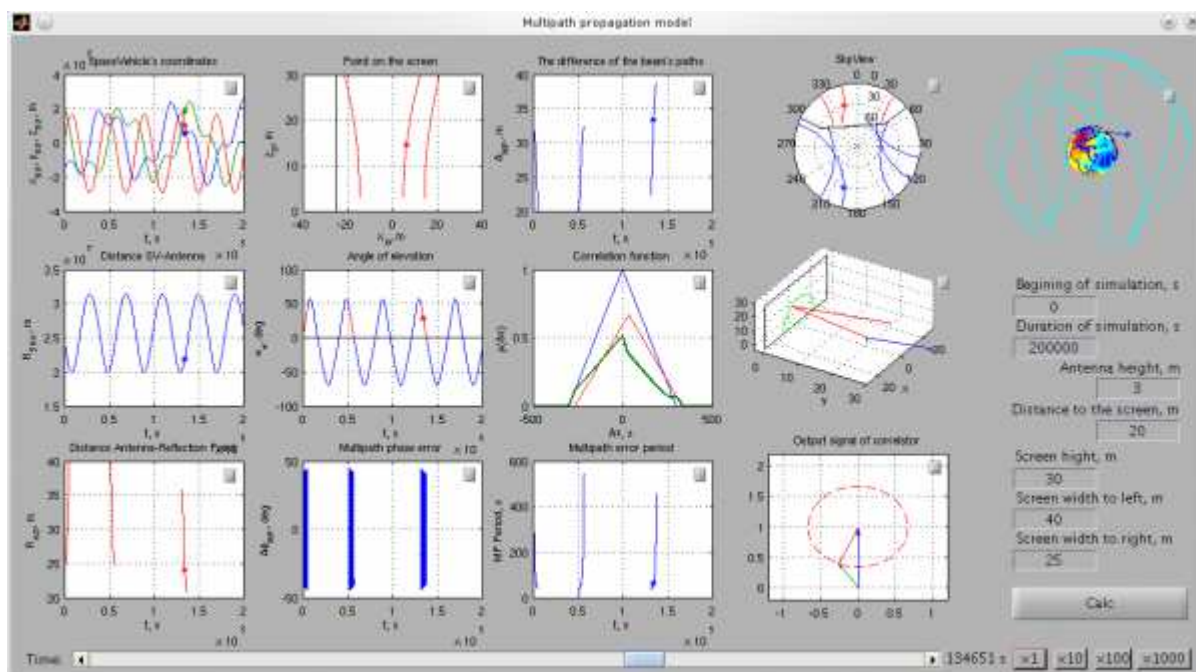


Рис. 6 Графический пользовательский интерфейс модели

С помощью интерфейса вводятся исходные данные для моделирования и производится запуск расчета. После выполнения расчета происходит отображение результатов на 13 графиках:

- Координаты спутника
- Расстояние между спутником и антенной
- Расстояние между антенной и точкой отражения
- Положение точки отражения на экране
- Угол возвышения спутника, горизонта и точки отражения
- Ошибка, вносимая в фазу многолучевым распространением сигнала
- Разность хода прямого и отраженного лучей
- Корреляционная функция для прямого, отраженного и суммарного сигналов
- Период ошибки, вносимой в фазу многолучевым распространением сигнала
- SkyView - графическое отображение угла возвышения и азимута спутника, экрана, точки отражения
- Трехмерный вид многолучевого распространения сигналов
- Представление выходного сигнала коррелятора на комплексной плоскости: прямой сигнал, отраженный сигнал и их суперпозиция
- Трехмерный вид движения спутника вокруг Земли

Каждый график можно открыть в отдельном окне с помощью кнопки в правом верхнем углу области.

С помощью слайдера внизу окна пользователь может выбирать любой момент времени из моделируемого интервала. С помощью кнопок правее слайдера - запускать проигрывание результатов (с различными коэффициентами ускорения).

Лабораторное задание

1. С помощью модели проверить результаты, полученные в пунктах 3 и 4 домашней подготовки, включить в отчет необходимые выходные данные моделирования.
2. Провести моделирование длительностью 5, 12, 48 часов. Провести самостоятельное исследование результатов в соответствии с темой лабораторной работы. Отразить результаты исследования (выводы, соответствующие результаты моделирования и теоретические обоснования) в индивидуальном отчете.

3. Представить результаты преподавателю.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. — 4-е, перераб. и доп. — М.: Радиотехника, 2010. — 800 с.

Шаблон индивидуальной таблицы параметров

Ф.И.О: _____

Группа: _____

Высота поднятия антенны: _____ м

Расстояние от антенны до экрана: _____ м

Высота экрана: _____ м

Ширина экрана: _____ м; _____ м

Используемая навигационная система: ГЛОНАСС/NAVSTAR GPS

Параметры орбиты в начальный момент времени:

- долгота восходящего узла _____ град
- наклонение орбиты - любая орбитальная плоскость системы, на выбор
- угол начального положения на орбите _____ град