

Задачи эксперимента МКС-Глонасс

Д.А. Демин, М.В. Терентьев, Н.П. Чубинский

*«Московский физико-технический институт (государственный университет)»,
demin.da@mipt.ru, max.terentyev@gmail.com, nchub940@yandex.ru*

В эксперименте МКС-Глонасс планируется несколько новых вариантов мониторинга ионосферы Земли. Первый связан с регистрацией сигналов навигационных спутников GPS и Глонасс на МКС и наземных приемных пунктах. Для осуществления второго требуется установки на МКС передатчика для излучения сигналов трех когерентных частот 150 МГц, 400 МГц и 1067 МГц. Они регистрируются в наземных приемных пунктах, расположенных вдоль меридианов. Кроме того, на МКС предполагается установить приемник сигналов тех же диапазонов (третий вариант), который должен регистрировать сигналы навигационных спутников типа Цикада и Transit. Результатом обработки этих данных будут профили полного содержания электронов (ПСЭ) в некоторой ограниченной области земной атмосферы.

In the experiment MKS-Glonass several new options are planned for monitoring the Earth's ionosphere. The first is associated with the registration of signals from GPS and Glonass navigation satellites on the ISS and ground receiving points. The implementation of the second requires the installation of a transmitter on the ISS to emit signals of three coherent frequencies 150 MHz, 400 MHz and 1067 MHz. They are registered at ground receiving points located along the meridians. In addition, the ISS is supposed to install a receiver of signals of the same ranges (the third option), which should register the signals of navigation satellites such as Cicada and Transit. The result of processing this data will be the profiles of the total electron content (TEC) in a certain limited region of the earth's atmosphere.

Данная работа концентрирует внимание на второй части эксперимента МКС [1] и уточняет некоторые научно-технические моменты его успешной реализации. Для этого на космической станции будет установлен передатчик трех когерентных частот (150 МГц, 400 МГц и 1067 МГц) и блок передающих антенн A_M . Излучение сигналов с орбиты на высоте $h_M=400$ км и их регистрация в приемных пунктах (ПП), расположенных в любой точке поверхности Земли в пределах широт наблюдения МКС, позволят получать в плоскости пролета спутника двумерные (высота-широта) сечения ПСЭ ионосферы на расстояниях 1...3 тыс. км за времена порядка 10–15 мин. Ожидается локально улучшить разрешающую способность восстановления профилей ПСЭ в нижней ионосфере.

Положительные результаты эксперимента зависят от качества радиоканала МКС-ПП, которое в первую очередь определяется его энергетическим потенциалом. Он должен быть достаточным, чтобы гарантировать регистрацию сигналов в ПП с заданным соотношением сигнал/шум в пределах площади земной поверхности, ограниченной радиогоризонтом. В первом приближении средняя мощность передатчика составляла около 5 Вт, а в послествии была ограничена одним Ваттом. Это связано с тем, что на МКС функционирует множество радиосистем и появление еще трех долговременно работающих источников могло нарушить лимиты спектральной плотности радиодфона в этих участках спектра. К счастью, предполагаемые излучения предельно узкополосны. Кроме того, энергетический потенциал должен сохраняться при всех взаимных расположениях МКС относительно ПП и связанной с этим ориентацией диаграмм направленности (ДН) их антенн. Ниже оценены энергетический потенциал эксперимента и параметры антенного блока, ограничивающие интервалы работы радиоканалов.

2. Для определения технических деталей обратимся к геометрии радиолиний МКС-наземный ПП. Пусть в сферической системе текущие координаты приемного пункта $r_p(R, \Theta_p, \Phi_p)$, а МКС – $r_M(R_M, \Theta_M, \Phi_M)$, причем $R=6380$ км – радиус Земли, а $R_M=R+h_M=\text{const}$ – радиус орбиты МКС. Введем угловые координаты МКС относительно ПП: $\theta=(\Theta_M-\Theta_p)$ – угол места (широта) и $\varphi=(\Phi_M-\Phi_p)$ – азимут (долгота). На рис. 1 схематично изображена орбита МКС над поверхностью Земли в относительных координатах θ и φ . Причем приведенные координаты ПП будут равны – $r_{p0}(R, 0, 0)$ а относительные координаты МКС – $r_{M0}(R+h_M, \theta, \varphi)$.

Построим сферу, на которой лежит орбита МКС ($M_0, \dots, M_i, \dots, M_m$), и проследим за проекцией подспутниковой точки МКС – $P_0, \dots, P_i, \dots, P_m$. Проведем касательную

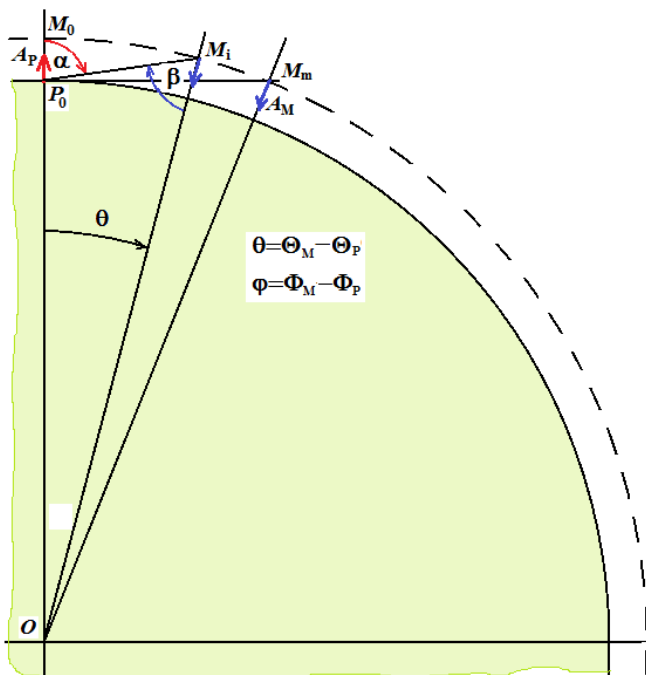


Рис. 1. Определение радиогоризонта при регистрации сигналов МКС в ПП.

в точке P_0 (в точке расположения ПП), которая отсекает от этой сферы сферический сегмент, он определяет линию горизонта и максимальное расстояние P_0M_m визирования МКС из ПП. На поверхности этого сегмента МКС (или любой спутник, движущийся на высоте 400 км) будет в пределах прямой видимости в ПП. Максимальная (горизонтальная) дальность видимости МКС равна $r_m = P_0M_m \approx \sqrt{2Rh_M} \approx 2300$ км. Угловая ширина сектора $\angle M_0OM_m = \theta_{max} \approx 20^\circ$.

На рис. 1 красной стрелкой показана ориентация максимумов ДН антенн в ПП, а синей стрелкой – антенн МКС. Тогда при расположении МКС над ПП максимумы ДН корреспондентов направлены соосно ($\theta=0^\circ$), то есть угол визирования МКС из ПП равен $\alpha_0=0^\circ$. При дальнейшем движении МКС угол $\angle M_0P_0M_i = \alpha(\theta_i)$ увеличивается до 90° в точке M_m . Следовательно требования к ширине ДН антенн в ПП $-0 \leq \alpha(\theta) \leq \pm 90^\circ$ при $0^\circ \leq \theta \leq \pm 20^\circ$. Для определения ширины ДН на МКС проанализируем изменение угла $\angle OP_0M_i = \beta(\theta_i)$ визирования ПП. Из геометрии взаимного положения МКС и ПП очевидно, что в точке M_0 $\beta(0)=0^\circ$. При увеличении угла θ до границы радиогоризонта ($\theta_m=20^\circ$) значение угла визирования будет равно $\beta_m=90^\circ-\theta_m=70^\circ$. Таким образом, необходимая ширина ДН антенн МКС составляет около $\pm 70^\circ$. Текущие значения углов $\alpha(\theta)$ и $\beta(\theta)$ можно выразить, определив длину радиолинии $P_0M_i(\theta_i)=r(\theta_i)$:

$$r^2(\theta_i) = R^2 + (R+h_m)^2 - 2R(R+h_m)\cos\theta_i, \quad (1)$$

$$\text{Sin}\alpha(\theta_i) = [(R + h_m) \text{Sin}\theta_i] / r(\theta_i), \quad (2)$$

$$\text{Cos}\beta(\theta_i) = [R(1 - \text{Cos}\theta_i) + h_m] / r(\theta_i). \quad (3)$$

3. Существенную роль для радиолинии МКС-ПП играют ориентации их ДН относительно линии визирования P_0M_i [2]. Сглаженные ДН антенн на МКС ориентированы максимумами в надир и качественно изображены на рис. 2 а, б, которые представляет собой объем, образованный вращением вытянутой кардиоиды вокруг оси z , а ось x – вдоль вектора скорости МКС. Искажения ДН связаны с тем, что блок антенн установлен у среза кормы МКС. В направлении полета x ДН «экранируется» корпусом МКС, научным оборудованием и солнечными батареями (рис. 2б), а в перпендикулярной плоскости (рис. 2а) – в основном цилиндрическим корпусом МКС.

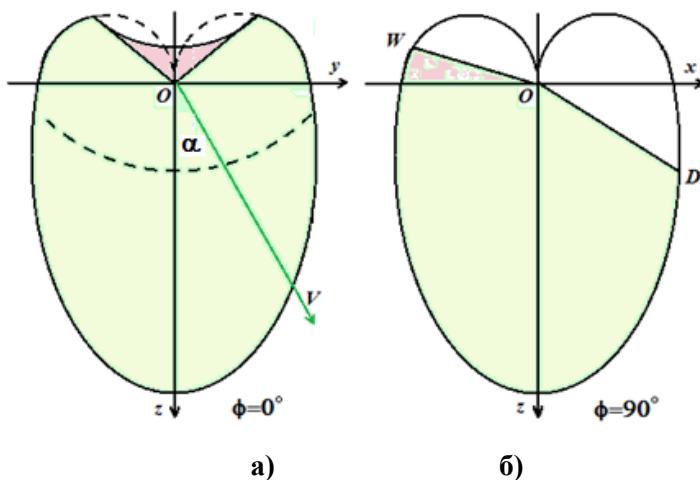


Рис. 2. ДН передающих антенн МКС: а) в плоскости, перпендикулярной вектору скорости, б) в вертикальной плоскости полета.

Причем в областях затенения и экранирования ДН антенн приобретают осциллирующий характер. В низкочастотном диапазоне колебания едва заметны, а в высокочастотном – глубина провалов достигает 10...15 дБ. Это относится к сферическому сектору Dox , ориентированному вдоль вектора скорости МКС. При этом рабочий угол визирования ПП в передней полусфере заметно уменьшается приблизительно на угол $\angle xOD$ (рис. 2б), что уменьшает время наблюдения МКС в ПП.

Итоговый телесный угол, в пределах которого МКС наблюдается в ПП, выделен зеленым цветом.

4. Более детально варианты регистрации сигналов в ПП, излучаемых с МКС, дает рис. 3а. На нем качественно отражена прямоугольная проекция части поверхности Земли Северного полушария с подспутниковым следом МКС, на котором отмечены положения Станции с интервалом около 5 минут. На проекции нанесены зоны прямой видимости для трех ПП в виде окружностей радиусом $r_m = 2300$ км. Качественно оценим эффективное время регистрации сигналов МКС в ПП a_i . Часть указанной на Рис. 3б зоны видимости МКС из ПП в точке a_2 с учетом экранирования излучения антенн, эскизно выделена зеленым цветом. На рис. 3в приведено приблизительное расположение этого элемента, ориентированного вдоль вектора скорости МКС, при различных вариантах перемещения станции относительно i -го ПП. Верхняя траектория b_1b_2 и далее соответствует прохождению зоны видимости вблизи вершины восходящего витка МКС (например, ПП a_2), а наклонная $b_3b_4b_5$ – прохождению МКС на восходящем витке (например, вблизи ПП a_1). На траектории b_1b_2 (рис. 3в) соединим положения фазовых центров b_j с координатами ПП ($a_i = a_2$) отрезками $a_i b_1, a_i b_2, \dots$. Если какой-либо отрезок пересекает изображение ДН и частично проходит по его белому участку (угловая область экранирования), будем считать что радиосвязь на этой трассе отсутствует. Только в точках b_j , для которых отрезок $a_i b_j$ проходит

полностью по зеленому полю, радиолиния работает в штатном режиме. Тогда в точке b_1 связь отсутствует, а в точке b_2 – появляется вплоть до точки пересечения радиогоризонта. На наклонной траектории $b_3b_4b_5$ связь работает на всем отрезке вплоть до границ радиогоризонта. Оценки показывают, что время работы радиоканала составит не более 55...60% от времени пролета зоны радиовидимости.

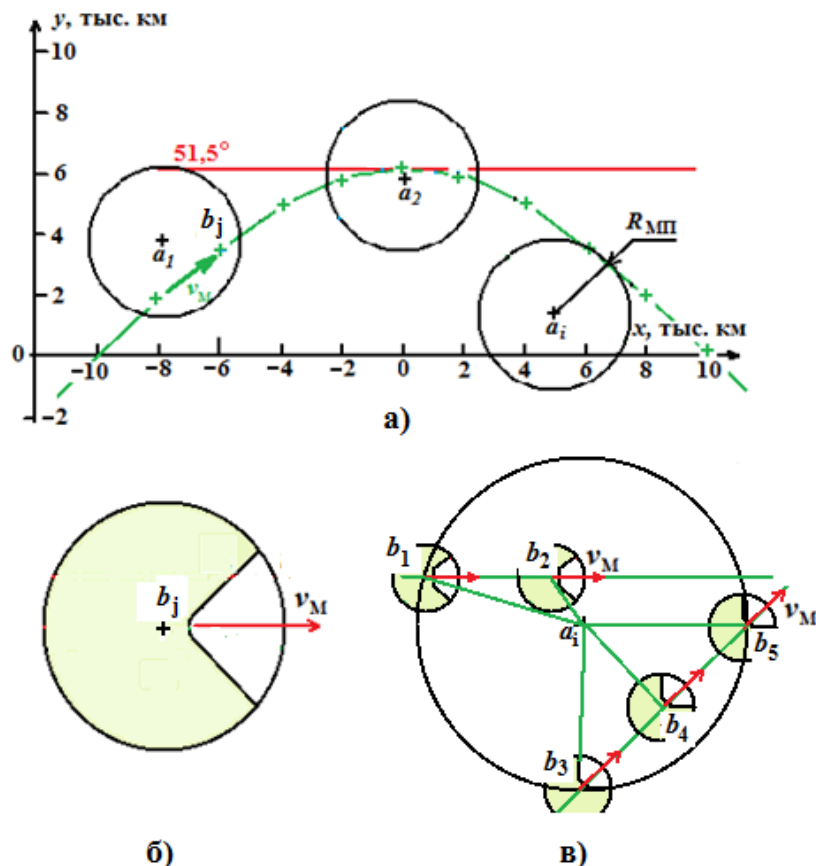


Рис. 3. Схема формирования радиоканала МКС-ПП: а) – схема расположения областей радиовидимости на разном удалении ПП от подспутникового следа, б) – сечение ДН антенны МКС с учетом экранирования, в) – схема определения времени наблюдения МКС в ПП a_i для двух траекторий: МКС: b_1-b_2 и b_3-b_5 .

5. Рассмотрим теперь достаточность лимитированной мощности передатчика МКС $P_M = 1$ Вт, для достижения уверенной работы радиолинии вплоть до границ радиовидимости [3]. Пусть энергетический потенциал трассы $Q \geq P_{Mn} / (P_{Pn})_{min}$, где $P_{Mn} \approx 1$ Вт – мощность n -го частотного канала передатчика МКС, а $(P_{Pn})_{min}$ – минимальная принимаемая мощность сигнала на входе наземного приемника n -го канала. Последняя определяется как $(P_{Pn})_{min} = k_1 k_2 k T \Delta f_n$, где k_1 – коэффициент шума приемника, k_2 – заданное соотношение сигнал/шум для штатной работы радиолинии (типичная величина $k_1 k_2 \approx 7 \dots 10$), $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ К/Вт – постоянная Больцмана, $T \approx 300$ К – эффективная температура приемной антенны и Δf_n – полоса частот n -го канала. Собственно излучаемый сигнал является высоко когерентным, но при перемещении МКС относительно ПП появляется доплеровский сдвиг частоты. Он пропорционален скорости $v(r, t_i)$ изменения расстояния $r(t_i)$ между МКС и ПП. Тогда доплеровский сдвиг $\Delta f_n = f_n v/c$ (c – скорость света). Скорость v достигает максимального значения, близкого к орбитальной скорости МКС $v_m = 7,62$ км/с на границе прямой

видимости, и соответствует траектории МКС, проходящей над ПП. Поскольку знак скорости зависит от того, увеличивается расстояние между МКС и ПП или уменьшается, необходима полоса пропускания приемника должна быть не менее $2(\Delta f_n)_{max}$. Она равна 7,62 кГц, 20,3 кГц и 54,3 кГц для частотных каналов 150 МГц, 400 МГц и 1067 МГц, соответственно, что определяет $(P_{Pn})_{min}$ в каждом диапазоне.

Оценим мощность принимаемого сигнала на границе радиогоризонта:

$$P_{rn} \approx P_{Mn} G_M(\theta_{M_6}, \varphi_{M_2}) D_P(\theta_{P_6}, \varphi_{P_2}) S_{an} / 4\pi r_{max}^2, \quad (4)$$

где $P_{Mn}=1$ Вт – излучаемая мощность, $G_M(\theta_{M_6}, \varphi_{M_2})$ – коэффициент усиления передающей антенны МКС под углом $(\theta_{M_6}, \varphi_{M_2})$ относительно радиус-вектора МКС, $D_P(\theta_{P_6}, \varphi_{P_2})$ – коэффициент направленного действия по мощности приемных антенн ПП под углом $(\theta_{P_6}, \varphi_{P_2})$ относительно радиус-вектора ПП (будем полагать, что в нижней полусфере $G_M=D_P \approx 1,5$), $S_{an} \approx 0,13\lambda_n^2$ – эффективные площади приемных антенн МКС ($\lambda_1=2$ м, $\lambda_2=0,75$ м, $\lambda_3=0,028$ м).

В Таблице для трех частотных каналов даны: 1) максимальные ширины спектров регистрируемых в ПП сигналов, 2) соответствующие им минимальные мощности на входе наземного приемника для $k_1 k_2=10$, 3) мощности принимаемых сигналов на границе радиогоризонта, 4) эффективное отношение сигнал/шум. В третьей строке для мощности P_{rn}^* , согласно (4) произведение $G_M(\theta_{M_6}, \varphi_{M_2}) D_P(\theta_{P_6}, \varphi_{P_2})=1$, а не $1,5^2=2,25$, поскольку на границе радиовидимости коэффициенты усиления антенн существенно уменьшаются относительно значения 1,5 в максимумах ДН. В первых двух диапазонах $(S/N)_{эф}$ на 1...2 порядка превышает минимальный уровень сигнала, а в третьем – находится на предельно допустимом уровне.

Таблица

	$n=1$ 150 МГц	$n=2$ 400 МГц	$n=3$ 1067 МГц
$(2\Delta f_n)$, кГц	7,62	20,3	54,3
$[N] - (P_{Pn})_{min}$, Вт	$3,1 \cdot 10^{-16}$	$8,4 \cdot 10^{-16}$	$2,25 \cdot 10^{-15}$
$[S] - P_{rn}^*$, Вт*	$8 \cdot 10^{-14}$	$1,1 \cdot 10^{-14}$	$1,5 \cdot 10^{-15}$
$(S/N)_{эф}$	260	13	0,67

Выводы

1. Определены требования к ДН антенн МКС и наземных ПП. При любой высоте наблюдаемого космического радиоисточника ширина ДН антенны ПП определяется радиогоризонтом и составляет $\pm 90^\circ$. Ширины ДН антенн МКС составляют $\pm 70^\circ$, а для любого космического аппарата – уменьшаются при увеличении высоты траектории. При $h_{КА} \geq 10R_з$ требуемая ширина ДН будет менее $\pm 6^\circ$.
2. Разработан компактный блок трех антенн, в том числе, нижняя антенна (150 МГц) и верхняя (1067 МГц) являются квадрифилярными, а средняя – турникетной с отклоненными на 30° вниз плечами. Все антенны имеют круговую поляризацию и идентичные ДН шириной более $(\pm 120^\circ)$. Они будут установлены на МКС и в наземных ПП.

3. Разработаны алгоритмы для расчета энергетики радиолиний, учитывающие эффективные трехмерные диаграммы направленности антенн при наличии влияния корпуса и аппаратуры МКС.
4. Отношение сигнал/шум при излучаемой мощности 1 Вт в диапазонах 150 МГц и 400 МГц выполняется с большим запасом, а на частоте 1067 МГц оно критическое. Возможны различные варианты решения, например, увеличить мощность передатчика на частоте 1067 МГц до 2 Вт, а в диапазонах 150 МГц и, 400 МГц – уменьшить в 100 и 10 раз соответственно.
5. Эффекты рефракции и дифракции радиоволн вблизи границ радиовидимости вносят существенный вклад в работу радиоканалов Цикада-МКС и требуют более подробного исследования. Тем более что на границе радиогоризонта уровень регистрируемых на МКС сигналов минимален.

Литература

1. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Наука. 2007. 336с.
2. Xudong Bai, Jingjing Tang, Xianling Liang. «Compact Design of Triple-band Circularly Polarized Quadrifilar Helix Antennas». – IEEE Antennas and wireless propagation letters, vol. 13. 2014
3. Спутниковая связь и вещание: Справочник. Под ред. Кантора Л.Я. . М.: Радио и Связь.1997. 528с.