

Варианты построения спутниковой системы для мониторинга стенда НААРР

Гуреев Э. Д., Мурлага А. Р.*

*Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт
имени А.И. Берга, ЦНИРТИ, Новая Басманная, 20, Москва, 105066, Россия*

**e-mail: myrlaga_olga@mail.ru*

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы контроля за воздействием на ионосферу мощного электромагнитного излучения, вырабатываемого наземными нагревными стендами. Предлагается построение спутниковой системы для мониторинга стенда НААРР как самого мощного и технически оснащенного из них. Приводятся результаты, показывающие, что на базе высокоэллиптических орбит невозможно построить универсальную систему прямого квазинепрерывного мониторинга стенда НААРР. Делается вывод о потенциальной возможности решения поставленной задачи при условии использования низких орбит либо установки на находящихся на высокоэллиптической орбите спутниках радиолокатора.

Ключевые слова

ионосфера, стенды нагрева ионосферы, спутниковая система мониторинга, высокоэллиптическая орбита

Ионосфера – область верхних слоёв земной атмосферы, где входящие в её состав газы частично ионизованы, в основном под влиянием солнечного излучения [1]. Известно, что ионосфера может оказывать существенное влияние на распространение радиоволн, вызывая их отражение, преломление и затухание [2-4]. Учёт этого влияния крайне важен при организации, например, канала связи земля – спутник или дальней локации.

В настоящее время разработаны и активно используются специализированные наземные нагревные стенды, способные с помощью мощных радиоволн, направленных вертикаль-

но вверх, вызывая в ионосфере заметные локальные возмущения, тем самым изменяя её свойства [1, 5 – 7]. При этом возникает ряд эффектов, позволяющих использовать их в различных целях, например:

- для влияния на системы локации и связи;
- для дистанционного зондирования удалённых территорий;
- для подповерхностного зондирования.

Схематическая иллюстрация использования искусственной модификации ионосферной плазмы для решения ряда практических задач приведена на рис. 1.

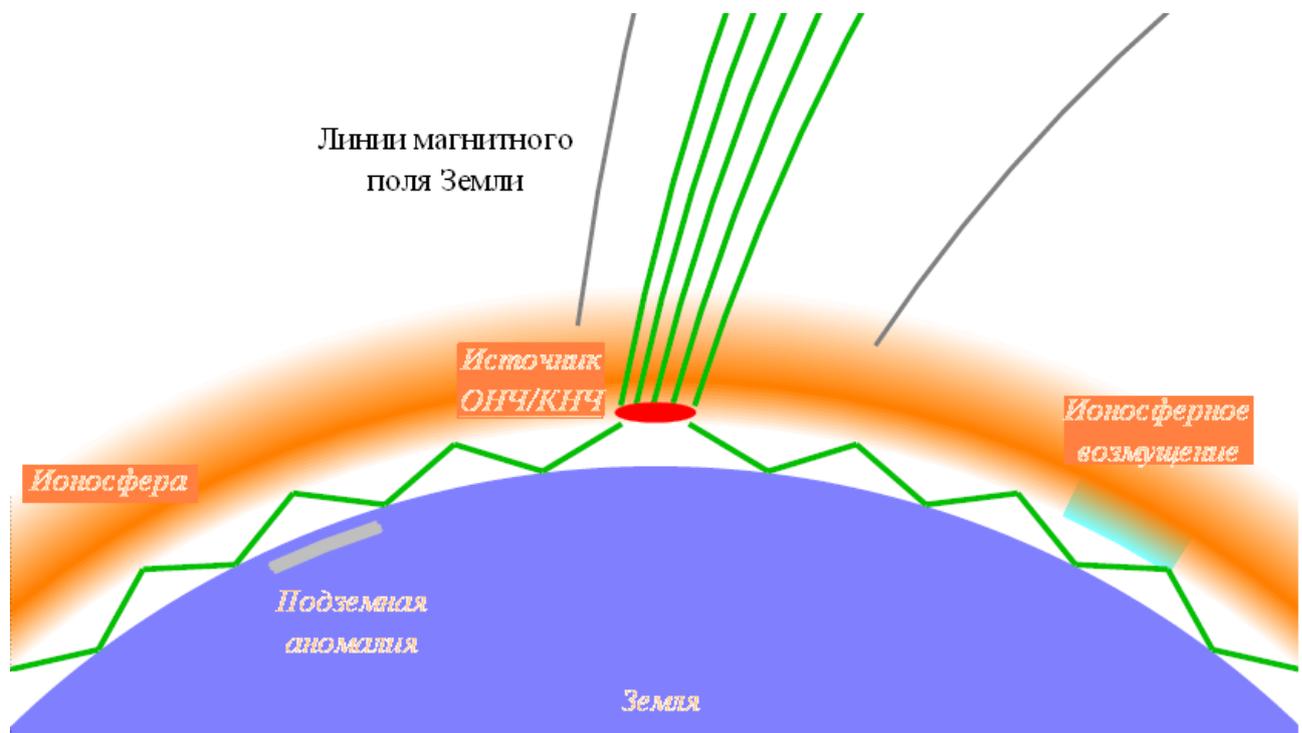


Рис. 1. Применение искусственной модификации ионосферной плазмы для решения задач дистанционного зондирования удалённых территорий и дальней локации [7]

Самым мощным и технически оснащённым из наземных нагревных стенов является расположенный на полигоне Гакона (штат Аляска, США) стенд HAARP¹, имеющий следующие параметры:

- излучающий массив – 180-элементная (прямоугольник 12×15) фазированная антенная решётка (ФАР);

¹ **HAARP** – High Frequency Active Auroral Research Program (Программа Высокочастотных Активных Авроральных Исследований)

- излучаемая мощность – 3,6 МВт;
- рабочий диапазон частот – 2,8 – 10 МГц;
- коэффициент усиления (КУ) антенного массива – до 31 дБ;
- ширина луча диаграммы направленности ФАР – $4,5^\circ$ – 15° .

Эти уникальные характеристики стенда НААРП позволяют с его помощью решать широкий спектр задач двойного назначения. Поскольку большинство проводимых на нём исследований закрыты, важно создать систему мониторинга с целью постоянного получения объективной информации о его деятельности. В качестве платформы для такой системы целесообразно выбирать спутник, который позволит напрямую контролировать изменение ионосферной плазмы под действием мощных радиоволн, излучаемых стендом НААРП. Задача мониторинга его работы при этом ставится следующим образом. Известно местоположение стенда НААРП ($62^\circ 23'$ с.ш., $145^\circ 08'$ з.д.) и характеристики его ФАР. Требуется определить:

1. Периодичность включения станции.
2. Параметры излучаемых станцией сигналов:
 - несущая частота;
 - вид поляризации излучения;
 - тип модуляции сигнала;
 - частота модуляции.
3. Отклонение главного лепестка диаграммы направленности антенной системы от нормали.

Результатом решения задачи мониторинга станет выявление взаимосвязи характеристик работы стенда НААРП с задачами, решаемыми с его помощью (локация, связь, дистанционное зондирование удалённых территорий и т.д.).

Прежде чем непосредственно перейти к построению орбитальной группировки для мониторинга стенда НААРП, необходимо определить углы визирования, т.е. те углы, с которых стенд виден со спутника. Вводя допущение, что апертура стенда круговая (это без потери общности выводов существенно упростит расчёты) и полагая, что запитка элементов ФАР равномерна по всей апертуре, получаем на основании [8] диаграмму направленности излучения антенного массива стенда НААРП (см. рис. 2). Поскольку её ширина, как следует из [8], зависит от рабочей частоты стенда, на рис. 2 представлены результаты расчётов углового положения главного и первого бокового лепестка диаграммы направленности стенда для двух граничных частот его рабочего диапазона (синим цветом – для $f=2,8$ МГц и красным цветом – для $f=10$ МГц).

Зная теперь углы визирования, построим спутниковую систему мониторинга деятельности стенда НААРР по критерию минимального времени ненаблюдения.

В рамках данного критерия предполагается, что никакой априорной информацией о работе стенда НААРР мы не располагаем. Под априорной информацией понимаются, главным образом, сведения о периодичности включения станции. Отсюда следует, что сеанс работы стенда может начаться в любой момент, а значит, мы должны смоделировать такую орбитальную группировку, чтобы иметь возможность постоянно наблюдать за его деятельностью.

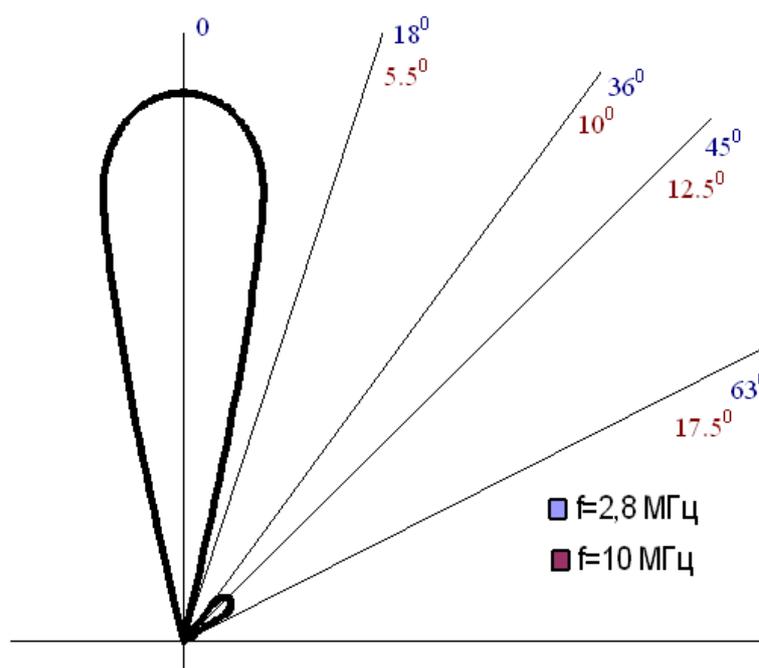


Рис. 2. Диаграмма направленности излучения антенного массива стенда НААРР (главный и первый боковой лепесток)

Алгоритм расчёта по критерию сводится к следующему. Для моделируемой системы выбирается орбита из соображений возможности ведения с неё квазинепрерывного наблюдения стенда НААРР. Под квазинепрерывностью будем понимать минимальное время ненаблюдения заданного объекта. Зная для выбранной орбиты положение подспутниковой точки в каждый момент времени, задавшись условием ведения мониторинга стенда НААРР по главному и первому боковому лепестку диаграммы направленности его антенного полотна и используя полученные результаты расчётов углов визирования, вычисляем время наблюдения стенда НААРР одним спутником. И, наконец, увеличиваем число спутников, добиваясь минимального времени ненаблюдения объекта.

Теперь перейдём к моделированию орбитальной группировки по изложенному критерию.

Из сказанного выше следует, что для реализации концепции критерия необходимо обеспечить максимально возможное время нахождения спутника над станцией НААРП. В этих условиях логичным стало бы применение геостационарной орбиты, известной тем, что подспутниковая точка находящегося на ней объекта неподвижна относительно Земли. Как следствие, задачу мониторинга станция НААРП можно было бы решить тогда с использованием всего одного спутника. Однако, применение геостационарной орбиты в нашей ситуации невозможно ввиду высокоширотного расположения объекта наблюдения. Ближайшей по своим параметрам к геостационарной орбите является высокоэллиптическая орбита типа «Молния», поэтому она и была выбрана для дальнейшего моделирования. Она имеет 2 витка по 12 часов каждый Угол её наклонения $i=63,4^\circ$ (задаётся исходя из условия устойчивости орбиты, т.е. отсутствия её прецессии с течением времени), а высота апогея – $h_a=40112$ км.

Рассчитав далее через каждые 5 минут движения по выбранной орбите координаты подспутниковой точки, а также соответствующие им углы визирования на основании представленных в [9] формул и сравнив их затем с вычисленными ранее углами визирования станции, получаем время наблюдения станция НААРП одним спутником (см. рис. 3). Следует отметить, что исходная орбита типа «Молнии» для получения оптимального результата была сдвинута по долготе на 34° .

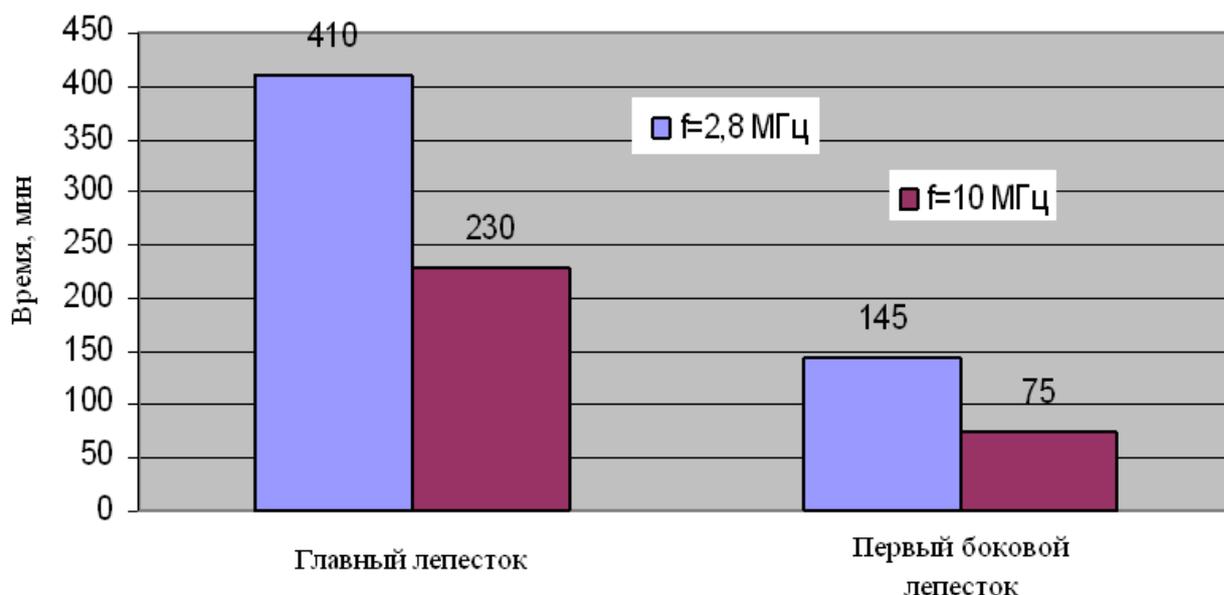


Рис. 3. Время наблюдения станция НААРП одним спутником, находящимся на высокоэллиптической орбите типа «Молния»

	2 спутника	3 спутника	4 спутника	8 спутников
$f_1=2,8$ МГц	330/22,9	2,5/0,17	0/0	0/0
$f_2=10$ МГц	820/56,94	510/35,4	275/19,1	0/0

Таким образом, на 8 спутниках можно построить систему непрерывного наблюдения стенда HAARP.

До настоящего момента мы не задавались вопросом о влиянии среды, т.е. ионосферы, на распространение радиоволн. Между тем учёт этого влияния (главным образом отражения радиоволн от слоёв ионосферы) налагает жёсткие ограничения на область применимости смоделированной спутниковой системы для мониторинга стенда HAARP. Базовой зависимостью, связывающей критическую частоту f_c (самая низкая частота, которая проникает в слой) и максимальную электронную концентрацию N_{\max} слоя, является формула Эпплтона [4], которая для однородной (в пространстве и во времени) среды в отсутствии соударений между её частицами и в отсутствии внешнего магнитного поля принимает вид:

$$N_{\max} = 1,24 \cdot 10^{10} f_c^2 \quad (1)$$

Здесь N_{\max} измеряется в м^{-3} , а f_c – в МГц.

Прохождение излучения насквозь через ионосферу эквивалентно тогда его проникновению в слой с максимальной электронной концентрацией, которая согласно [10] днём равна $N_{\max} = 1,6 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ (высота соответствующего ионосферного слоя $h=300$ км), а ночью $N_{\max} = 3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ($h=400$ км). При таких значениях N_{\max} вычисления по (1) дают $f_c=11,3$ МГц днём и $f_c=4,9$ МГц ночью. Отсюда следует, что спутниковая система для мониторинга стенда HAARP, построенная на высокоэллиптических орбитах, применима в ночные часы при частоте излучения станции выше 4,9 МГц и не применима во всех остальных случаях.

На основании представленных выше расчётов следует, что на любых орбитах, высоты которых больше 400 км, универсальную систему для мониторинга стенда HAARP построить невозможно ввиду отражения излучаемых станцией сигналов от ионосферных слоёв. Под универсальной системой будем понимать систему, постоянно способную регистрировать сигнал от стенда HAARP независимо от его режима работы и времени включения.

Решение задачи построения универсальной спутниковой системы для мониторинга стенда HAARP видится в переходе к низким (высоты $\sim 300 - 400$ км) орбитам. Кроме того, возможен вариант с установкой на находящиеся на высокоэллиптической орбите типа «Мол-

ния» спутниках радиолокаторов. Однако рассмотрение этих вопросов выходит за рамки настоящей статьи и является предметом дальнейших исследований.

Библиографический список

1. У. Ютло, Р. Козн. Изменение ионосферы под действием мощных радиоволн// Успехи физических наук, том 109, вып. 2, 1973. – с. 371 – 387.
2. Ratcliffe J.A., *The Magneto-Ionic Theory and its Applications to the Ionosphere*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1962. – 207 p.
3. Budden K.G., *Radio Waves in the Ionosphere*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1961. – 542 p.
4. К. Дэвис. Радиоволны в ионосфере. – М.: Издательство «Мир», 1973. – 504 с.
5. G.I. Mingaleva, V.S. Mingalev. Response of the convecting high-latitude F layer to a powerful HF wave. *Ann. Geophysicae*, **15**, 1291 – 1300, 1997.
6. В.А. Алексащенко, С.И. Дворников, В.Г. Дмитриев и др. Активное воздействие на ионосферу сверхмощными наземными комплексами// Вестник Академии военных наук, № 3 (8), 2004. – с. 131 – 137.
7. M.B. Cohen. ELF/VLF phased array generation via frequency-matched steering of a continuous HF ionospheric heating beam, Ph. D. thesis, Stanford University, 2009. – 213 p.
8. Р. Кюн. Микроволновые антенны. – Ленинград: Издательство «Судостроение», 1967. – 520 с.
9. Инженерный справочник по космической технике. Изд. 2-е, перераб. и доп. Под ред. А.В. Солодова. – М.: Воениздат, 1977. – 430 с.
10. А.В. Гуревич, А.Б. Шварцбург. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. – М.: Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1973. – 272 с.