

УДК 510.535: 537.531: 629.783

**УТОЧНЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ
КРИТЕРИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРИ
ПОСТРОЕНИИ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ ДЛЯ
МОНИТОРИНГА ИЗЛУЧЕНИЯ СТЕНДА НААРР**

А. Р. Мурлага

ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

Статья получена 17 февраля 2014 г.

Аннотация. В статье обсуждается применение спутниковых систем для мониторинга из космоса за ионосферой после её управляемого искусственного возбуждения. Предлагается построение орбитальной группировки для непрерывного получения данных о стенде НААРР. Целью статьи является вычисление вероятности работы станции в данный момент времени на заданной несущей частоте на основе обработки совокупности априорных данных о деятельности стенда НААРР в январе – марте 2008 года. В результате были уточнены значения целевой функции критерия максимальной информативности, которая принимает максимальное значение для рабочей частоты станции 2,7 МГц. В условиях ночи оно равно $P(S_n, m)=0,175$, а в условиях дня $P(S_n, m)=0,097$. Анализ высот отражения сигналов стенда НААРР от ионосферы для имеющейся совокупности априорных данных показал, что мониторинг станции из космоса по её первичному излучению невозможен в дневные часы, а в ночные часы для решения такой задачи потребуется построение низкоорбитальной группировки спутников.

Ключевые слова: ионосфера, стенды нагрева ионосферы, НААРР, спутниковая система мониторинга, природные антенны СНЧ/ОНЧ волн.

Abstract. An application of satellite systems for monitoring of the ionosphere from space after its artificial steerable disturbance is discussed in this paper. An arrangement of orbit group for continuous HAARP data acquisition is suggested. The purpose of the paper includes an estimation of probability of station activity in

current instant for its given carrier frequency. This estimation is based on *a priori* data handling about HAARP heater activity during January – March 2008. As a result limit values of goal function in maximum information criterion were specified. This function takes the maximum value for station carrier frequency 2.7 MHz. It is $P(S_H, m)=0,175$ at night and $P(S_H, m)=0,097$ by day. An analysis of reflecting heights from ionosphere for HAARP signals involving current *a priori* data reveals an inability of station monitoring from space in daytime using only its primary radiation. To solve the problem at night one must use low orbit satellite group.

Keywords: ionosphere; ionosphere heating facilities; HAARP, space system for monitoring; natural ELF/VLF antennas.

Введение

Стенд HAARP¹ (62°23'с.ш., 145°08'з.д.) является сложным многофункциональным инструментом, позволяющим за счёт мощного направленного излучения собственного антенного массива (180-элементная – прямоугольник 12×15 – фазированная антенная решётка) управлять естественными процессами, протекающими в ионосфере и магнитосфере Земли [1-4]. Исходный сигнал, вырабатываемый станцией, порождает здесь целую цепь процессов (рис. 1).

Первичное излучение станции, модулируя токи полярной электроструи, создаёт в ионосфере диполь на частоте модуляции сигнала [5]. Вторичное излучение образованного таким образом диполя является существенно анизотропным. Сигнал, идущий от него в нижнюю полуплоскость, запитывает волновод «земля-ионосфера», реализуя тем самым концепцию сверхдальней связи [1] (в т.ч. с подводными лодками [6]), локации и зондирования (в т.ч. подповерхностного [7]). Сигнал верхней полуплоскости уходит в магнитосферу и распространяется вдоль магнитных силовых линий Земли в сопряжённую точку, расположенную в соседней полусфере [8]. В результате взаимодействия

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

с высокоэнергетическими частицами, находящимися в экваториальной области магнитосферы, такой сигнал при определённых условиях способен вызывать триггерные эффекты (третичное излучение), сопровождающиеся генерацией очень низкочастотных (ОНЧ) колебаний [9, 10]. Появляется возможность влияния на радиационные пояса Земли (совокупность электронов и ионов, захваченных магнитным полем Земли и распространяющихся вдоль его силовых линий между двумя зеркальными точками) [11]: изменение положения зеркальных точек под действием внешних возмущающих сил приводит к рассеянию частиц из радиационных поясов и осаждению их в плотные слои атмосферы. Как следствие, локально меняется баланс ионизации в ионосфере и атмосфере, возникает рентгеновское излучение и свечение, что влияет на функционирование систем связи, локации и навигации.

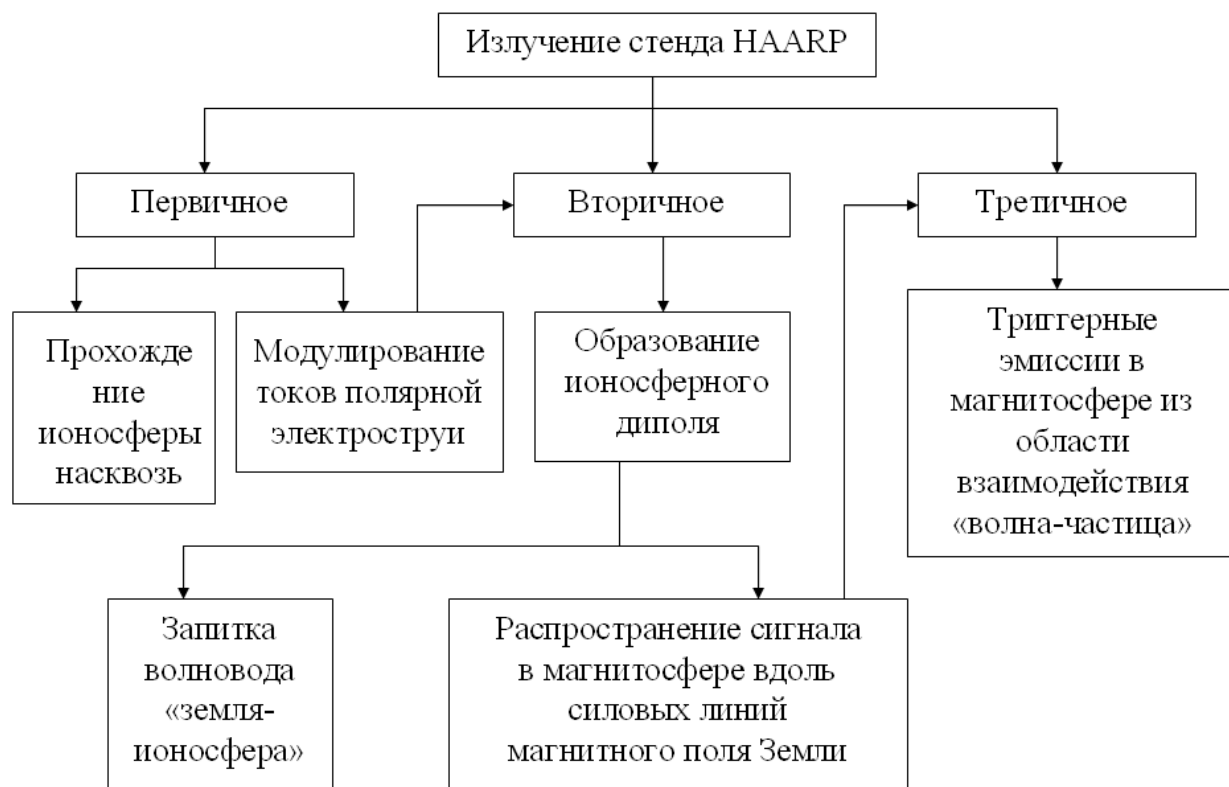


Рис. 1. Основные результаты воздействия излучения стенда HAARP на ионосферу и магнитосферу

1. Постановка задачи

Эффекты, возникающие в ионосфере и магнитосфере в результате

преднамеренного управляемого воздействия мощного излучения с поверхности Земли, можно использовать для решения ряда задач двойного назначения. Не случайно работы, проводимые по программе HAARP, финансируются различными военными службами и ведомствами США [4, 5, 8]. Отсюда очевидна важность организации мониторинга за процессами в ионосфере и магнитосфере, вызванными деятельностью станции. Такой мониторинг можно осуществлять с различных платформ: наземной, космической, наводной, воздушной. При этом каждая из указанных платформ несёт с собой как преимущества, так и недостатки. В рамках настоящей работы нас будет интересовать мониторинг станда HAARP со спутника по следующим причинам:

1. Космическая платформа позволяет регистрировать результаты работы станции, принципиально недоступные для наблюдения с других платформ, а именно первичное излучение в режиме работы станции «на просвет», вторичное излучение, распространяющееся в магнитосфере, третичное излучение.
2. Появляется возможность построения унифицированной орбитальной группировки, способной решать одновременно множество научных и прикладных задач. При этом мониторинг за стандом HAARP будет лишь одной из них. Как следствие, получаем выигрыш по критерию «эффективность-стоимость».
3. Подобных космических систем, по имеющимся у нас сведениям, на данный момент не существует. Таким образом, задача построения орбитальной группировки является новой.

Мониторинг станда HAARP можно вести по первичному, вторичному и третичному излучению. От выбора типа излучения зависит выбор высоты орбит, компоновка орбитальной группировки и требования к составу бортовой аппаратуры. Далее будем рассматривать орбитальную группировку, осуществляющую мониторинг станда HAARP по первичному излучению.

Для построения орбитальной группировки необходимо выработать критерии и разработать методы расчёта по ним. Эти задачи подробно рассмотрены в [12, 13], где описаны четыре критерия (критерий минимального времени ненаблюдения станции, критерий максимальной информативности, стоимостной критерий и критерий «эффективность-стоимость»), объединённых в два класса (учитывающих финансовые затраты при построении орбитальной группировки и не учитывающие их). Кроме того, построение спутниковой системы мониторинга может базироваться на априорных данных о деятельности станда HAARP, которые играют важную роль при моделировании орбитальной группировки. Так, их правильное использование даёт возможность уменьшить число спутников в группировке, снизить её стоимость и упростить структуру, сократить время, требующееся для развёртывания такой группировки и, кроме всего прочего, упростить наземную инфраструктуру, обслуживающую спроектированную орбитальную группировку. Поэтому не случайно, что два критерия моделирования орбитальной группировки из четырёх, а именно критерий максимальной информативности и критерий «эффективность-стоимость», учитывают априорные данные о деятельности станда HAARP².

Остановимся подробнее на критерии максимальной информативности. При его постулировании в [12] целевая функция критерия ($P(S_n, m)$ – вероятность P получения в данный момент времени информации от станда HAARP в зависимости от накопительной суммы S_n отношения рабочих дней станда HAARP к календарным (априорная информация) и числа спутников m) вводилась, как

$$P = P_1 \cdot P_2 \quad (1)$$

² Следует, однако, помнить, что результаты проектирования орбитальной группировки с использованием упомянутых критериев будут очень сильно зависеть от количества и качества априорной информации о деятельности станда HAARP, что накладывает ограничения на применение таких критериев. И наконец, априорная информация о деятельности станда HAARP в данных конкретных случаях может быть просто не доступна. В этих условиях следует прибегнуть к критериям, не учитывающим априорную информацию, а именно к критерию минимального времени ненаблюдения станда HAARP и стоимостному критерию.

где P_1 – вероятность работы станда HAARP в данный момент времени; P_2 – вероятность в тот же момент времени пролёта спутника из орбитальной группировки над местом расположения станда HAARP. Подчеркнём, что под вероятностью P_1 понимался просто выход станции в эфир независимо от параметров излучаемого ею при этом сигнала. Однако, как следует из [12, 14], от несущей частоты станции будет зависеть высота отражения сигнала от ионосферы, что при работе системы мониторинга по первичному излучению станда HAARP скажется при выборе высот орбит для неё. Поэтому в (1) под P_1 будем теперь понимать вероятность работы станда HAARP в данный момент времени на заданной несущей частоте. Переменные P и P_2 имеют тот же смысл, что и ранее.

Цель статьи – вычисление переменной P_1 на основе обработки совокупности априорных данных о деятельности станда HAARP в январе – марте 2008 года и уточнение граничных значений целевой функции критерия максимальной информативности.

2. Анализ априорных данных о рабочих частотах включения станда HAARP в период с января по март 2008 года

Рассмотрим совокупность априорных данных о деятельности станда HAARP за три первых месяца 2008 года. Эти данные включают сведения о моментах включения станции, её несущей частоте и длительности работы в течение каждого сеанса. Приняв, что ночные часы делятся с 22⁰⁰ по 07⁰⁰, а дневные, соответственно, с 07⁰⁰ по 22⁰⁰ по местному времени (Аляска), можно вычислить относительную частоту β_f (в процентах) включений станции на каждой её рабочей частоте на протяжении всего периода, для которого имеются априорные данные.

$$\beta_f = \frac{\sum_{i=1}^n t_{if}}{N \cdot t_p} \cdot 100\% \quad (2)$$

Здесь t_{if} – время в минутах i -го включения станции на рабочей частоте f ; n – число таких включений в данном месяце в данное время суток (днём или ночью); N – число календарных дней в данном месяце; t_p – время в минутах в данном месяце в данное время суток.

Расчёты по (2) дают следующие графики β_f (рис. 2 и рис. 3).

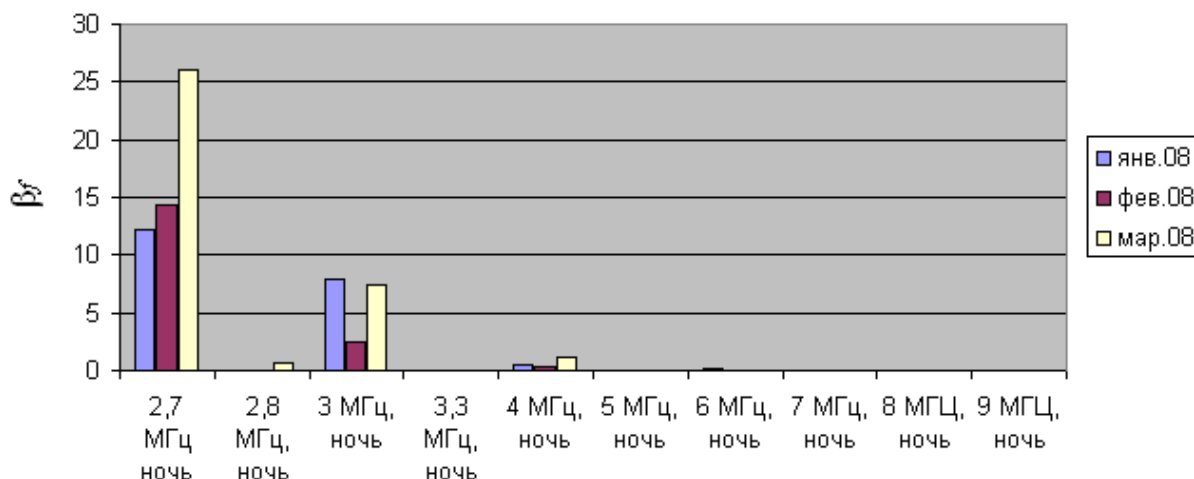


Рис. 2. Относительная частота β_f включений станда HAARP в ночное время на каждой его рабочей частоте на протяжении первых трёх месяцев 2008 года

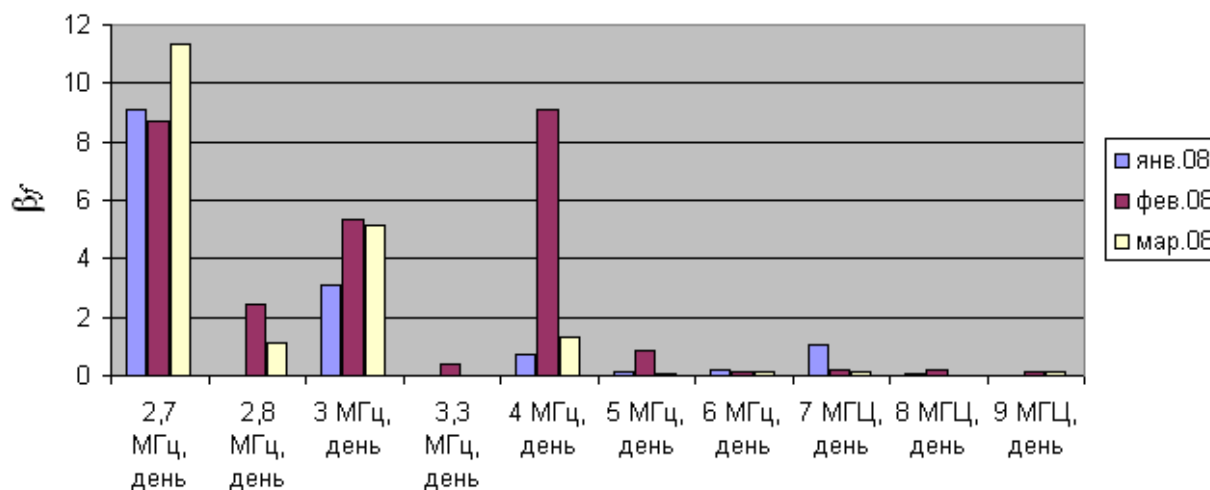


Рис. 3. Относительная частота β_f включений станда HAARP в дневное время на каждой его рабочей частоте на протяжении первых трёх месяцев 2008 года

Проанализируем полученные результаты. В ночные часы (см. рис. 2):

1. Основная работа проводится в низкочастотной области рабочего диапазона станции, причём более 90% всех включений наблюдается на двух частотах (2,7 и 3 МГц).

2. Относительная частота включений стенда HAARP на конкретных частотах от месяца к месяцу может значительно (в два и более раз) варьироваться, при этом характер включений на протяжении всех трёх месяцев 2008 года остаётся неизменным.
3. От месяца к месяцу могут появляться новые рабочие частоты и пропадать старые.
4. С увеличением рабочей частоты станции относительная частота её включений уменьшается по нелинейному закону.
5. Шаг сетки частот рабочего диапазона станции равен 1 МГц, если рабочая частота станции больше 4 МГц.

В дневные часы (см. рис. 3):

1. Работы проводятся на частотах вплоть до 9 МГц, т.е. практически полностью охвачен весь рабочий диапазон станции.
2. Большая часть включений стенда HAARP наблюдается на частотах, не превышающих 4 МГц.
3. Относительная частота включений стенда HAARP на конкретных частотах от месяца к месяцу может значительно (во много раз) варьироваться, при этом меняется и характер включений.
4. От месяца к месяцу могут появляться новые рабочие частоты и пропадать старые.
5. Шаг сетки частот рабочего диапазона станции равен 1 МГц, если рабочая частота станции больше 4 МГц.

4. Вычисление значения P_1 на основании априорных данных о рабочих частотах включения стенда HAARP в период с января по март 2008 года

Опираясь на найденные в разделе 3 значения относительной частоты β_f включений стенда HAARP в ночное и дневное время на каждой его рабочей частоте на протяжении первых трёх месяцев 2008 года, вычислим значение P_1 , которое есть не что иное, как среднее арифметическое значение β_f и определяется по формуле

$$\langle \beta_f \rangle = \frac{\sum_{j=1}^k \beta_{jf}}{k} \quad (3)$$

Здесь j – календарный месяц, для которого вычисляется относительная частота включений стенда НААРР; k – число месяцев, по которым производится усреднение. В нашем случае $k=3$.

Вычисленные по формуле (3) значения $\langle \beta_f \rangle$ приведены на графиках (рис. 4 и рис. 5) для случая ночи и дня, соответственно.

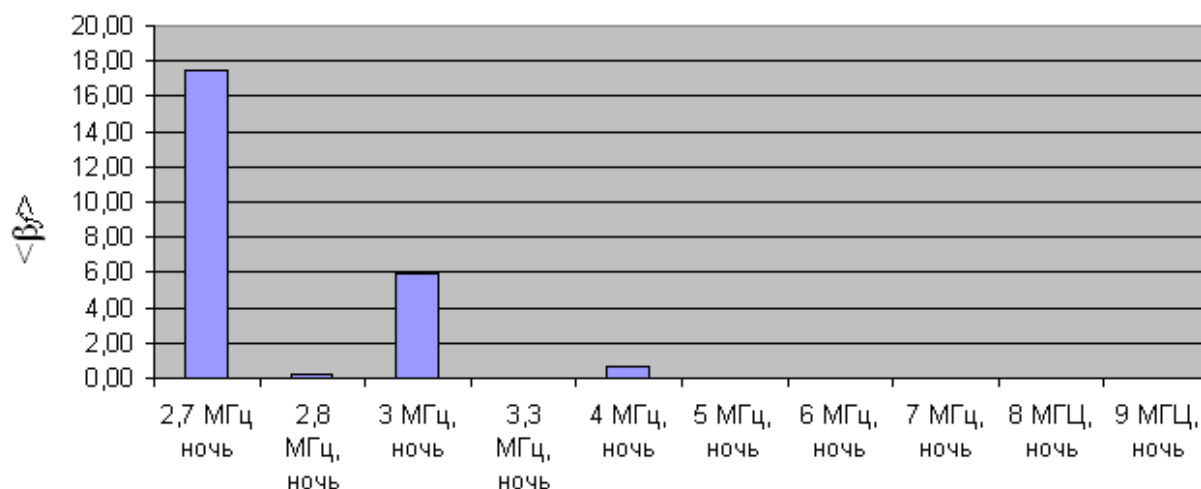


Рис. 4. Средняя арифметическая относительная частота $\langle \beta_f \rangle$ включений стенда НААРР в ночное время на каждой его рабочей частоте на протяжении первых трёх месяцев 2008 года

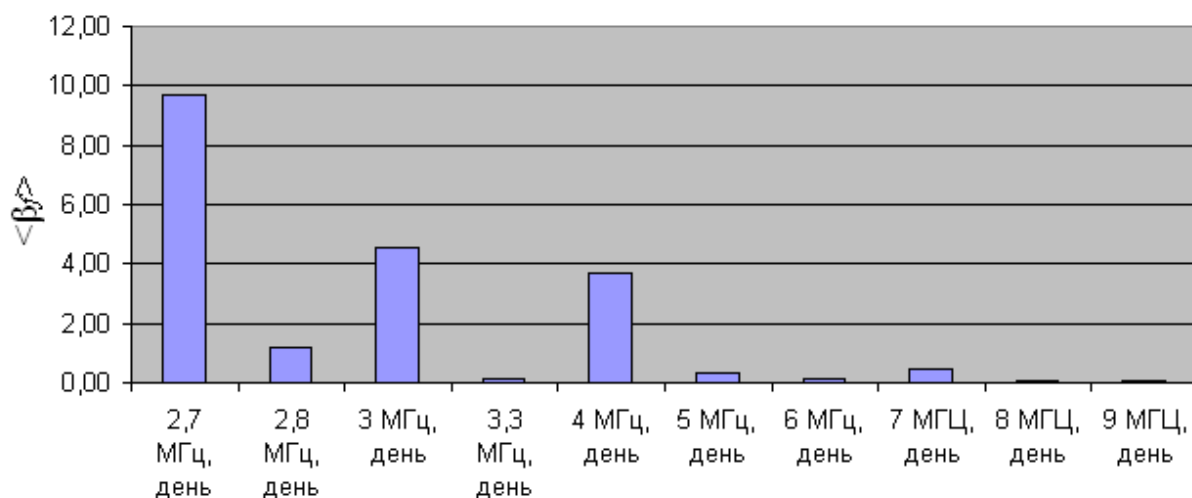


Рис. 5. Средняя арифметическая относительная частота $\langle \beta_f \rangle$ включений стенда НААРР в дневное время на каждой его рабочей частоте на протяжении первых трёх месяцев 2008 года

5. Обсуждение результатов

Из приведённого в [12] примера расчёта спутниковой системы мониторинга станции по критерию максимальной информативности, базировавшегося на использовании совокупности априорных данных о периодичности выхода в эфир станда HAARP за период с января 2007 года по май 2009 года, следует, что целевая функция критерия не может превышать значения $P(S_n, m) = 0,2804 \pm 0,0281$. Причём это значение достигается при условии обеспечения непрерывного наблюдения станда HAARP, т.е. когда $P_2=1$ (в орбитальной группировке при этом должно быть не менее $m=8$ спутников).

В нашем случае, как видно из рис. 4 и 5, при условии $P_2=1$ значение целевой функции критерия максимальной информативности $P(S_n, m)=P_1=\langle\beta_u\rangle$ на каждой рабочей частоте станда HAARP для случая дня и ночи будет своё, но непременно меньше приведённой в [12] величины. При этом максимальное значение целевой функции наблюдается для рабочей частоты станции 2,7 МГц и в условиях ночи равно $P(S_n, m)=0,175$, а в условиях дня $P(S_n, m)=0,097$.

Опираясь на зависимости, полученные в [12], можно связать рабочую частоту станда HAARP с высотой отражения излучаемого им сигнала от ионосферы или с высотой, на которой будет сформирован ионосферный излучающий диполь («антенна в небе»). Согласно [15] в высоких широтах при условии вертикального зондирования ионосферы возможны три уровня отражения сигнала ($X=1$, $X=1-Y$ и $X=1+Y$), которые и приведены в таблице 1 для случая дня и ночи для каждой рабочей частоты станда HAARP, зафиксированной в январе – марте 2008 года. Знак « ∞ » в таблице 1 означает, что излучение проходит ионосферу насквозь, не испытывая отражения, а полужирным шрифтом выделены высоты отражения, встречавшиеся наиболее часто за исследованный период времени (на основании средней арифметической относительной частоты $\langle\beta_f\rangle$ включений станда HAARP, представленной на рис. 4 и рис. 5).

Таблица 1. Высоты отражения от ионосферы излучаемого станцией НААРР сигнала в зависимости от его рабочей частоты

Частота, МГц	Высота отражения, км					
	X=1		X=1-Y		X=1+Y	
	День	Ночь	День	Ночь	День	Ночь
2,7	103	295	96	280	125	330
2,8	105	300	97	282	128	340
3	107	312	98	285	132	360
3,3	125	325	100	290	136	370
4	138	360	120	320	146	390
5	150	∞	140	390	175	∞
6	180	∞	155	∞	210	∞
7	215	∞	200	∞	225	∞
8	235	∞	215	∞	248	∞
9	250	∞	240	∞	263	∞

Учитывая, что из-за воздействия плотных слоёв атмосферы нижняя высота полёта спутника должна находиться выше 200 км, из таблицы 1 получаем, что первичное излучение станции, работающей на частотах, встречавшихся по статистике наиболее часто в период с января по март 2008 года, недоступно для мониторинга из космоса в дневные часы, а в ночные часы для решения такой задачи потребуется построение низкоорбитальной группировки спутников.

6. Выводы

Анализ совокупности априорных данных за период с января по март 2008 года, включающих сведения о продолжительности сеансов работы станция НААРР на различных несущих частотах излучаемых им сигналов, позволил уточнить полученные ранее в [12] граничные значения целевой функции критерия максимальной информативности. Эти значения различны для случая дня и ночи для каждой из несущих частот, используемых в работе станции, однако существенно меньше значения, отмеченного в [12] ($P(S_n, m) = 0,2804 \pm 0,0281$). Максимальное значение целевой функции наблюдается для рабочей частоты станции 2,7 МГц и в условиях ночи равно

$P(S_n, m)=0,175$, а в условиях дня $P(S_n, m)=0,097$. Эти цифры справедливы при условии обеспечения непрерывного наблюдения станда HAARP (в орбитальной группировке при этом должно быть не менее $m=8$ спутников). Анализ высот отражения сигналов станда HAARP от ионосферы для имеющейся совокупности априорных данных показывает, что мониторинг станции из космоса по её первичному излучению невозможен в дневные часы, а в ночные часы для решения такой задачи потребуется построение низкоорбитальной группировки спутников.

Литература

1. R.C. Moore, U.S. Inan, T.F. Bell, and E.J. Kennedy, ELF waves generated by modulated HF heating of the auroral electrojet and observed at a ground distance of ~ 4400 km, *J. Geophys. Res.*, **112**, A05309, doi: 10.1029/2006JA012063, 2007.
2. M.B. Cohen, R.C. Moore, M. Golkowski, and N.G. Lehtinen, ELF/VLF wave generation from the beating of two HF ionospheric heating sources, *J. Geophys. Res.*, **117**, A12310, doi: 10.1029/2012JA018140, 2012.
3. K. Papadopoulos, N.A. Gumerov, X. Shao, I. Doxas, and C.L. Chang, HF-driven currents in the polar ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L12103, doi: 10.1029/2011GL047368, 2011.
4. M. Golkowsky, U.S. Inan, A.R. Gibby, and M.B. Cohen, Magnetospheric amplification and emission triggering by ELF/VLF waves injected by the 3.6 MW HAARP ionospheric heater, *J. Geophys. Res.*, **113**, A10201, doi: 10.1029/2008JA013157, 2008.
5. M.B. Cohen, M. Golkowsky, and U.S. Inan, Orientation of the HAARP ELF ionospheric dipole and the auroral electrojet, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L02806, doi: 10.1029/2007GL032424, 2008.
6. R. Barr et al., ELF and VLF radio waves, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **62**, 1689-1718, 2000.

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.
8. U.S. Inan, M. Golkowsky, D.L. Carpenter, N. Reddell, R.C. Moore, T.F. Bell, E. Paschal, P. Kossey, E. Kennedy, and S.Z. Meth, Multi-hop whistler mode ELF/VLF signals and triggered emissions excited by the HAARP HF heater, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L24805, doi: 10.1029/2004GL021647, 2004.
9. R.A. Helliwell. VLF wave stimulation experiments in the magnetosphere from Siple Station, Antarctica, *Rev. Geophys.*, **26**, 551-578, 1988.
10. U.S. Inan and R.A. Helliwell. DE-1 observations of VLF transmitter signals and wave-particle interactions in the magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 917, 1982.
11. Jasna Ristic-Djurovic, L., Gyroresonant scattering of radiation belt electrons by oblique whistler waves, Ph.D. thesis, Dep. of Electr. Eng., Stanford Univ., Stanford, Calif., 1993.
12. А. Мурлага. Основы построения спутниковой системы для мониторинга стенда HAARP// Монография. *LAP LAMBERT Academic Publishing*, 2013. – 52 с.
13. Мурлага А.Р. Порядок выбора критерия при построении спутниковой системы для мониторинга излучения создаваемых стендом HAARP природных антенн СНЧ и ОНЧ волн// Сборник докладов VII Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: Издание JRE – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2013. – с. 202 – 204.
14. Мурлага А.Р. Определение высот орбит спутниковой системы для мониторинга стенда HAARP. Сборник докладов конференции «RLNC 2013». Т. 3. – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2013. – с. 1790-1795.
15. К. Дэвис. Радиоволны в ионосфере. – М.: Издательство «Мир», 1973. – 504 с.