

# МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА ИСКУССТВЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ СО СПУТНИКА

<sup>1</sup>Замуруев С. Н., <sup>2</sup>Мурлага А. Р.

<sup>1</sup>МИРЭА-Российский технологический университет, <http://www.mirea.ru>

Москва 119454, Российская Федерация

<sup>2</sup>ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга, <http://www.cnirti.ru>

Москва 107078, Российская Федерация

Поступила 05.04.2018

Представлена действительным членом РАЕН Быстровым В.П.

Статья посвящена контролю искусственных изменений в ионосфере со спутника. Искусственные изменения вызываются путем воздействия на ионосферу мощными радиоволнами, вырабатываемыми наземными нагревными стендами. Если момент выхода в эфир стенда, периодичность его включений, а также параметры излучаемых им сигналов (несущая частота, частота модуляции, вид модуляции) неизвестны и при этом требуется рассчитать параметры орбитальной группировки спутников, способной регистрировать первичное излучение или результаты деятельности стенда, то такую задачу предложено называть обратной. Результат решения обратной задачи мониторинга – множество моделей орбитальных группировок, отличающихся параметрами. В целях выбора наилучшего решения (модель орбитальной группировки с оптимальными параметрами) синтезирована модельная функция, позволяющая дать интегральную характеристику орбитальной группировке мониторинга и связывающая внешние параметры орбитальной группировки (целевая информация, получаемая орбитальной группировкой от стенда; финансовые затраты, необходимые для развёртывания орбитальной группировки; время, требующееся для развёртывания орбитальной группировки). Внешние параметры орбитальной группировки – это то, чем характеризует орбитальную группировку потребитель. Внешние параметры орбитальной группировки являются функциями её внутренних параметров (тип и параметры орбит, количество орбит, взаимная ориентация орбит, количество спутников в группировке и на каждой орбите, взаимное расположение спутников на каждой орбите). Внутренние параметры орбитальной группировки – это то, чем характеризует орбитальную группировку разработчик. В статье рассмотрены три критерия и соответствующих метода решения обратной задачи мониторинга наземного нагревного стенда, разработанных для наиболее распространенных ограничений, накладываемых потребителем на внешние параметры орбитальной группировки. Приведен пример решения обратной задачи мониторинга по критерию минимального времени ненаблюдения стенда, показывающий, что мониторинг первичного излучения типового нагревного стенда при условии отсутствия ограничений по стоимости и времени развёртывания орбитальной группировки, отсутствия априорной информации о работе стенда, а также требования ведения непрерывного мониторинга первичного излучения стенда, целесообразно осуществлять орбитальной группировкой, состоящей из восьми спутников, находящихся на высокоэллиптической орбите типа «Молния», сдвинутой по долготе на 34°.

*Ключевые слова:* модификация ионосферы; нагревные стенды; обратная задача; спутниковый мониторинг

УДК 629.783:551.535

## СОДЕРЖАНИЕ

- |   |  |
|---|--|
| 1. ВВЕДЕНИЕ (24)  | 3.3. КРИТЕРИЙ «ЭФФЕКТИВНОСТЬ – СТОИМОСТЬ»(25)                                |
| 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ (24)                                   | 4. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ (26)                                       |
| 3. КРИТЕРИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ (25)                | 4.1. МЕТОД РАСЧЁТА ПО КРИТЕРИЮ МИНИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НЕНАБЛЮДЕНИЯ СТЕНДА (26) |
| 3.1. КРИТЕРИЙ МИНИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НЕНАБЛЮДЕНИЯ СТЕНДА (25) | 4.2. МЕТОД РАСЧЁТА ПО СТОИМОСТНОМУ   |
| 3.2. СТОИМОСТНЫЙ КРИТЕРИЙ (25)                              |  |

КРИТЕРИЮ (26)

4.3. МЕТОД РАСЧЁТА ПО КРИТЕРИЮ «ЭФФЕКТИВНОСТЬ-СТОИМОСТЬ» (26)

5. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА ПО КРИТЕРИЮ МИНИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НАБЛЮДЕНИЯ СТЕНДА (27)

6. ВЫВОДЫ (29)

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (29)

ЛИТЕРАТУРА (29)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении нескольких последних десятилетий в мире получило значительное распространение использование ионосферы и магнитосферы для решения широкого спектра научных и прикладных задач, в том числе в области локации, дистанционного зондирования и связи [1-8].

Попытки управления естественными процессами, протекающими в ионосфере и магнитосфере, подразумевают искусственное кратковременное изменение свойств указанных оболочек Земли при помощи мощных радиоволн, вырабатываемых наземными передатчиками, с последующей регистрацией полученных изменений, в том числе с применением аппаратуры, расположенной на спутниках.

Так, например, изучалось взаимодействие когерентных очень низкочастотных (ОНЧ) волн и высокоэнергетических частиц в магнитосфере. В качестве источников первичного излучения выступали широкополосный управляемый ОНЧ передатчик разработки Стенфордского университета (Siple Station, Антарктида) и навигационный ОНЧ передатчик «Omega» (Северная Дакота, США). Результаты эксперимента регистрировались широкополосным (1...32 кГц) ОНЧ приёмником, находящимся на спутнике ISEE-1 [9].

В другом эксперименте исследовалось взаимодействие электронов магнитосферы, обладающих энергией от 85 эВ до 6.9 кэВ, с ОНЧ излучением, генерируемом станцией Siple Station на поверхности Земли. Результаты эксперимента регистрировались аппаратурой спутника EXOS-B (широкополосным (0.3...9 кГц) ОНЧ приёмником и детектором частиц (4 эВ...6.9 кэВ)) [10-11].

Бортовая аппаратура спутника DEMETER использовалась для экспериментальной оценки

суммарной инжектированной в волновод Земля-ионосфера мощности крайне низкочастотного излучения (118...1197 Гц), сформированного путём искусственной управляемой с поверхности Земли модуляции токов полярной электроструи нагревным стендом [12].

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Все рассмотренные примеры объединяет то обстоятельство, что в них решалась прямая задача мониторинга изменения состояния ионосферы или магнитосферы, заключающаяся в следующем [13]:

- момент включения наземного стенда известен априори;
- параметры передаваемого наземным стендом сигнала известны априори;
- наблюдение результатов работы наземного стенда проводится одним спутником;
- параметры орбиты спутника и состав бортовой аппаратуры подбираются на основании известных априорных данных;
- спутниковые исследования носят поисковый характер (проводится набор статистики, не предъявляются требования к непрерывности наблюдения, параметры изучаемых с Земли сигналов могут быть повторены сколь угодно много раз).

Если же момент очередного выхода в эфир наземного стенда, периодичность его включений, а также параметры излучаемых стендом сигналов априори неизвестны и при этом требуется регистрировать бортовой аппаратурой спутника первичное излучение или результаты деятельности наземного стенда (например, геометрические размеры, местоположение и физические свойства нагретого пятна в ионосфере), то получаем обратную задачу мониторинга [14].

Отличительная особенность обратной задачи от прямой состоит в том, что обратная задача может иметь множество решений, каждое из которых – орбитальная группировка спутников, характеризующихся своим набором параметров (количество спутников в группировке; параметры орбиты, параметр орбитальной группировки, характеризующий взаимное расположение спутников на орбите). Указанные параметры предлагается называть внутренними параметрами

орбитальной группировки, поскольку в процессе поиска оптимального решения обратной задачи мониторинга они подлежат изменению в определённых пределах. Напротив того, внешние параметры орбитальной группировки являются исходными данными для моделирования и последующему изменению не подлежат. Внешние параметры орбитальной группировки – это то, чем характеризует орбитальную группировку потребитель. Внутренние параметры орбитальной группировки – это то, чем характеризует орбитальную группировку разработчик. Внешние параметры орбитальной группировки являются функциями её внутренних параметров.

Связь между внешними параметрами орбитальной группировки даёт модельная функция [14]:

$$\Psi(I, F, t) = I^\alpha \cdot F^\beta \cdot t^\gamma,$$

где  $I$  – функция, характеризующая информацию, получаемую от объекта мониторинга (стенда);  $F$  – функция, характеризующая финансовые затраты, необходимые для развёртывания орбитальной группировки;  $t$  – функция, характеризующая время, требующееся для развёртывания орбитальной группировки;  $\alpha, \beta, \gamma \in [-1; +1]$  – постоянные коэффициенты, зависящие от условий задачи.

### 3. КРИТЕРИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Различные наборы исходных данных и ограничений формируют критерии моделирования [14].

#### 3.1. Критерий минимального времени ненаблюдения стенда

Применяется, когда требуется создать орбитальную группировку, способную при минимальном количестве спутников осуществлять непрерывный мониторинг стенда. Ограничения по стоимости и времени развёртывания орбитальной группировки отсутствуют. Априорная информация о работе стенда отсутствует.

$$I(q_j, m, d) = t_{n/obs}(q_j, m, d),$$

$$\alpha = 1, \beta = 0, \gamma = 0,$$

$$\Psi(I, F, t) = t_{n/obs}(q_j, m, d),$$

где  $t_{n/obs}$  – время ненаблюдения (non-observation) объекта мониторинга (стенда);  $m$  – количество

спутников в группировке;  $q_j$  –  $j$ -й параметр орбиты ( $j \in [1, \dots, k]$ , где  $k$  – общее количество параметров орбиты);  $d$  – внутренний параметр орбитальной группировки, характеризующий взаимное расположение спутников на орбите.

Цель расчёта по критерию – нахождение таких параметров  $q_j$  и  $d$ , при которых одновременно достигаются минимума параметр  $m$  и модельная функция  $\Psi$ :

$$\Psi_{opt}(I, F, t) : \{q_j, m, d\} \rightarrow \begin{cases} m = \min, \\ \Psi(I, F, t) = 0. \end{cases}$$

#### 3.2. Стоимостный критерий

Применяется, когда требуется создать орбитальную группировку, способную осуществлять мониторинг стенда с минимальным пропуском сигнала от стенда (либо с минимальным пропуском информации о результатах деятельности стенда), при условии, что стоимость орбитальной группировки не должна превышать  $Y$ . Ограничение по времени развёртывания орбитальной группировки отсутствует. Априорная информация о работе стенда отсутствует.

$$I(q_j, m, d) = t_{n/obs}(q_j, m, d),$$

$$\alpha = 1, \beta = 0, \gamma = 0,$$

$$\Psi(I, F, t) = t_{n/obs}(q_j, m, d),$$

Цель расчёта по критерию – нахождение таких параметров  $q_j, m$  и  $d$ , при которых внешний параметр  $F$  не превышает величины  $Y$ , а модельная функция  $\Psi$  достигает минимума:

$$\Psi_{opt}(I, F, t) : \{q_j, m, d\} \rightarrow \begin{cases} F(q_j, m) \leq Y, \\ \Psi(I, F, t) = \min, \end{cases}$$

где  $Y$  – предельная стоимость орбитальной группировки.

#### 3.3. Критерий «эффективность – стоимость»

Применяется, когда требуется с привлечением минимального финансирования создать орбитальную группировку, способную осуществлять мониторинг стенда с минимальным пропуском сигнала от стенда (либо с минимальным пропуском информации о результатах деятельности стенда). Ограничение по времени развёртывания орбитальной группировки отсутствует. Априорная информация о работе стенда отсутствует.

$$\Psi(I, F, t) = \frac{t_{obs}(q_j, m, d)}{F(q_j, m)},$$

где  $t_{\text{obs}}$  – время наблюдения объекта мониторинга (стенда).

Цель расчёта по критерию – нахождение таких параметров  $q_j$ ,  $m$  и  $d$ , при которых модельная функция  $\Psi$  достигает максимума:

$$\Psi_{\text{opt}}(I, F, \delta): \{q_j, m, d\} \rightarrow \Psi(I, F, \delta) = \max.$$

## 4. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

### 4.1. Метод расчёта по критерию минимального времени ненаблюдения стенда

1. Формируют исходные данные для моделирования – определяют углы визирования стенда (угловое расстояние, при прохождении которого спутник из состава орбитальной группировки наблюдает стенд).

А. В случае непосредственного мониторинга излучения стенда:

- выбирают лепесток (лепестки) диаграммы направленности фазированной антенной решетки (ФАР) стенда, по которому будет проводиться мониторинг его работы;

- вычисляют ширину выбранного лепестка (лепестков) диаграммы направленности ФАР стенда.

Б. В случае мониторинга за результатами работы стенда определяют геометрический размер области ионосферы, модифицированной в результате работы стенда.

2. Для моделируемой системы выбирают орбиту и оптимизируют её параметры, добиваясь минимального времени ненаблюдения стенда одним спутником.

$$\{q_{j\text{opt}}\}: \{q_j\} \rightarrow t_{n/\text{obs}}(q_j, m = 1) = \min.$$

3. Оптимизируют взаимное расположение спутников на орбите, добиваясь минимального времени ненаблюдения стенда орбитальной группировкой.

$$\{m, d\} \rightarrow \begin{cases} m = \min, \\ t_{n/\text{obs}}(q_{j\text{opt}}, m, d) = \min. \end{cases}$$

### 4.2. Метод расчёта по стоимостному критерию

1. Формируют исходные данные для моделирования – определяют углы визирования стенда.

А. В случае непосредственного мониторинга излучения стенда:

- выбирают лепесток (лепестки) диаграммы

направленности ФАР стенда, по которому будет проводиться мониторинг его работы;

- вычисляют ширину выбранного лепестка (лепестков) диаграммы направленности ФАР стенда.

Б. В случае мониторинга за результатами работы стенда определяют геометрический размер области ионосферы, модифицированной в результате работы стенда.

2. Для моделируемой системы выбирают орбиту и оптимизируют её параметры, добиваясь минимального времени ненаблюдения стенда одним спутником.

$$\{q_{j\text{opt}}\}: \{q_j\} \rightarrow t_{n/\text{obs}}(q_j, m = 1) = \min.$$

3. Учитывая ограничение финансовых ресурсов, привлекаемых для развёртывания орбитальной группировки, определяют максимальное количество спутников в орбитальной группировке.

$$\{m_0\}: \{m\} \rightarrow \begin{cases} m = \max, \\ F(q_{j\text{opt}}, m) \leq Y. \end{cases}$$

4. Оптимизируют взаимное расположение спутников на орбите, добиваясь минимального времени ненаблюдения стенда орбитальной группировкой.

$$\{d\} \rightarrow t_{n/\text{obs}}(q_{j\text{opt}}, m_0, d) = \min.$$

### 4.3. Метод расчёта по критерию «эффективность-стоимость»

1. Формируют исходные данные для моделирования – определяют углы визирования стенда (угловое расстояние, при прохождении которого спутник из состава орбитальной группировки наблюдает стенд).

А. В случае непосредственного мониторинга излучения стенда:

- выбирают лепесток (лепестки) диаграммы направленности ФАР стенда, по которому будет проводиться мониторинг его работы;

- вычисляют ширину выбранного лепестка (лепестков) диаграммы направленности ФАР стенда.

Б. В случае мониторинга за результатами работы стенда определяют геометрический размер области ионосферы, модифицированной в результате работы стенда.

2. Для моделируемой системы выбирают орбиту и оптимизируют её параметры, добиваясь максимального времени наблюдения стенда одним спутником.

$$\{q_{j\text{opt}}\}: \{q_j\} \rightarrow t_{\text{obs}}(q_j, m = 1) = \max.$$

3. Для каждого количества спутников, входящих в состав орбитальной группировки, оптимизируют взаимное расположение спутников на орбите, добиваясь максимального времени наблюдения стелда орбитальной группировкой.

$$\{d_{opt}\} : \{m, d\} \rightarrow t_{obs}(q_{jopt}, m, d) = \max.$$

4. На основании априорных данных синтезируют функцию финансовых затрат  $F(q_{jopt}, m)$ .

5. Синтезируют модельную функцию  $\Psi(m)$  орбитальной группировки.

$$\Psi(m) = \frac{t_{obs}(q_{jopt}, m, d_{opt})}{F(q_{jopt}, m)}.$$

6. Определяют количество спутников в орбитальной группировке, при котором модельная функция принимает максимальное значение.

$$m_0 : \{m\} \rightarrow \Psi(m) = \max.$$

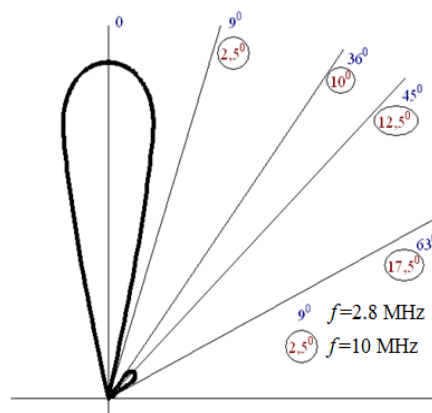
### 5. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА ПО КРИТЕРИЮ МИНИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НЕНАБЛЮДЕНИЯ СТЕЛДА

Пусть требуется создать орбитальную группировку, способную при минимальном количестве спутников осуществлять непрерывный мониторинг первичного излучения стелда. Ограничения по стоимости и времени развёртывания орбитальной группировки отсутствуют. Априорная информация о работе стелда отсутствует.

В качестве объекта мониторинга выберем типовой нагревнй стелд, расположенный в авроральной зоне, обладающий большой эффективной мощностью (до единиц ГВт) в диапазоне рабочих частот от 2.8 до 10 МГц. Диаграмма направленности излучения ФАР стелда (главный и первый боковой лепесток) для двух граничных частот его рабочего диапазона приведена на **рис. 1**.

В качестве орбиты для орбитальной группировки мониторинга выберем высокоэллиптическую орбиту типа «Молния» (угол наклонения  $i = 63.4^\circ$ , высота апогея  $h_a = 40112$  км; орбита имеет 2 витка по 12 часов каждый), поскольку применение геостационарной орбиты оказывается невозможным ввиду высокоширотного расположения объекта наблюдения [15].

На основании данных рис. 1 рассчитано

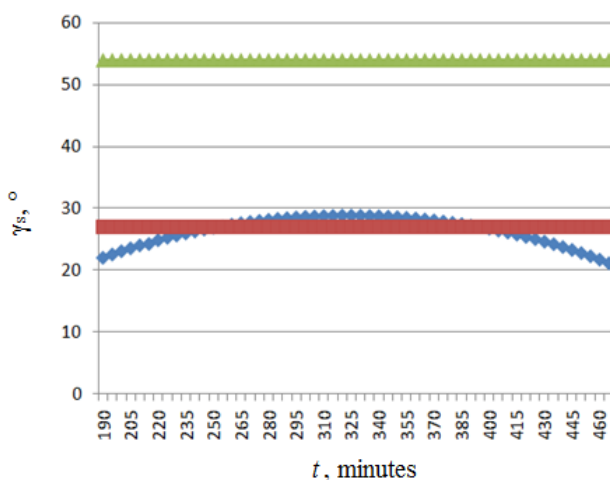


**Рис. 1.** Диаграмма направленности излучения ФАР типового нагревного стелда (главный и первый боковой лепесток) для двух граничных частот его рабочего диапазона.

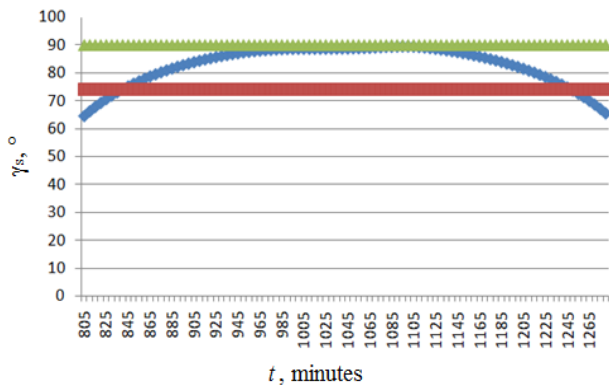
время наблюдения типового нагревного стелда одним спутником. Весь комплекс вычислений осуществляется с использованием численного алгоритма разработки АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга». Временной шаг при расчётах выбран из условия компромисса между требуемой точностью определения искомым параметров и объёмом обрабатываемых данных и принят  $t = 5$ , т.е. погрешность вычисления периодов наблюдения/ненаблюдения стелда составила  $\pm 5$  минут.

Проведённые расчёты дали неудовлетворительный результат (малое время наблюдения первичного излучения стелда одним спутником).

Параметры исходной орбиты скорректированы (осуществлён её сдвиг по



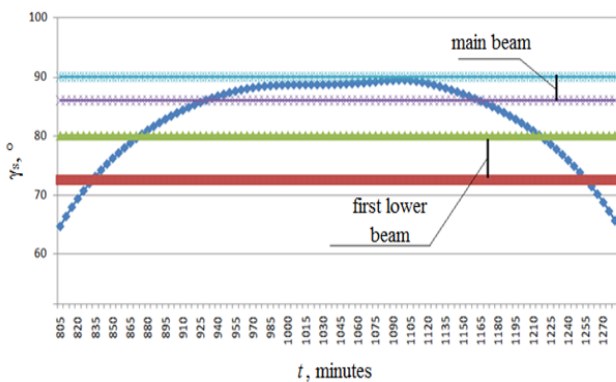
**Рис. 2.** Наблюдение типового нагревного стелда на частоте  $f = 2.8$  МГц по первому боковому лепестку излучения его ФАР со спутника, находящегося на высокоэллиптической орбите типа «Молния», сдвинутой по долготе на  $34^\circ$  ( $\gamma_s$  – угол визирования стелда.)



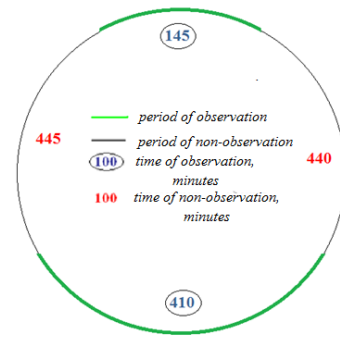
**Рис. 3.** Наблюдение типового нагревного стенда на частоте  $f = 2.8$  МГц по главному лепестку излучения его ФАР со спутника, находящегося на высокоэллиптической орбите типа «Молния», сдвинутой по долготе на  $34^\circ$ .

долготе на  $34^\circ$ ). В результате на частоте  $f = 2.8$  МГц на первом витке получили время наблюдения стенда по первому боковому лепестку излучения его ФАР 145 минут или 10.1% от времени полного суточного цикла (рис. 2), а на втором витке – по главному лепестку 410 минут или 28.5% от времени полного суточного цикла (рис. 3). На частоте  $f = 10$  МГц первый виток оказывается нерабочим, а на втором витке получено последовательно наблюдение стенда по первому боковому лепестку излучения его ФАР 35 минут или 2.4% от времени полного суточного цикла, затем по главному лепестку 230 минут или 16.0% от времени полного суточного цикла и, наконец, вновь по первому боковому лепестку 45 минут или 3.1% от времени полного суточного цикла (рис. 4).

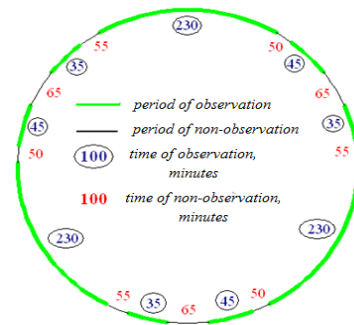
Построена математическая модель орбитальной группировки с использованием временного цикла – воображаемого круга,



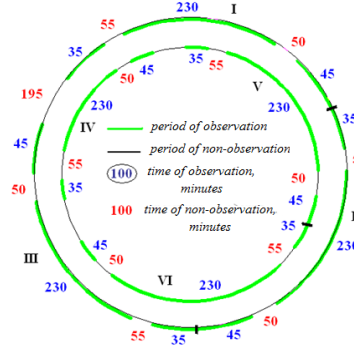
**Рис. 4.** Наблюдение типового нагревного стенда на частоте  $f = 10$  МГц по главному и первому боковому лепестку излучения его ФАР со спутника, находящегося на высокоэллиптической орбите типа «Молния», сдвинутой по долготе на  $34^\circ$ .



a



b



c

**Рис. 5.** Временной цикл для одного спутника, ведущего мониторинг типового нагревного стенда, работающего на частоте  $f_1 = 2.8$  МГц (a), для трёх спутников, ведущих мониторинг типового нагревного стенда, работающего на частоте  $f_2 = 10$  МГц (b), и для шести спутников, ведущих мониторинг типового нагревного стенда, работающего на частоте  $f_2 = 10$  МГц (c) (римские цифры показывают номера спутников в орбитальной группировке).

полная длина дуги которого равна 24 часам или 1440 минутам. Различная компоновка положения спутников на орбите соответствует в таком случае совокупности времён наблюдения и ненаблюдения типового нагревного стенда на временном цикле. Примеры временных циклов показаны на рис. 5.

Оптимизация расположения спутников на орбите даёт следующие результаты:  $\Psi = 0$  при  $m = 8$  (рис. 6).

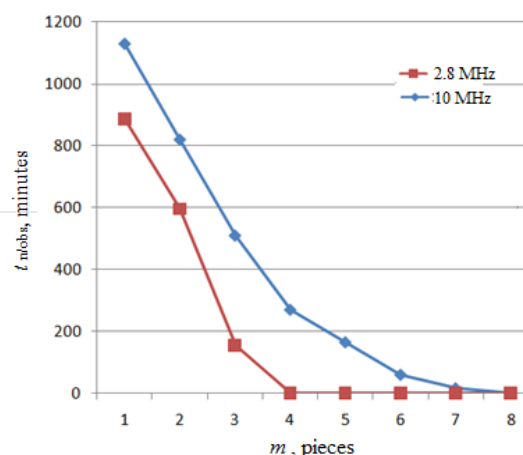


Рис. 6. Время ненаблюдения  $t_{n,obs}$  типового нагревного стенда орбитальной группировкой, включающей в себя  $m$  спутников, для двух граничных частот работы стенда.

## 6. ВЫВОДЫ

1. Предложена классификация параметров произвольной орбитальной группировки, заключающаяся в разделении параметров на внешние и внутренние. Внешние параметры орбитальной группировки являются функциями её внутренних параметров.
2. В целях создания орбитальной группировки с оптимальными внутренними параметрами разработан математический метод, позволяющий интегрально охарактеризовать любую орбитальную группировку. В основе метода лежит синтез модельной функции, которая устанавливает связь между внешними параметрами орбитальной группировки.
3. Для практического применения предложенного математического метода разработан набор методов расчёта, учитывающих различные требования потребителя к внешним параметрам орбитальной группировки.
4. Приведен пример решения обратной задачи мониторинга по критерию минимального времени ненаблюдения стенда, показывающий, что мониторинг первичного излучения типового нагревного стенда при условии отсутствия ограничений по стоимости и времени развёртывания орбитальной группировки, отсутствия априорной информации о работе стенда, а также требования ведения непрерывного мониторинга первичного излучения стенда целесообразно осуществлять орбитальной группировкой, состоящей из восьми спутников, находящихся на высокоэллиптической орбите

типа «Молния», сдвинутой по долготе на  $34^\circ$ .

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование созданного в рамках настоящей работы методического аппарата позволяет синтезировать орбитальные группировки мониторинга излучения (или результатов работы) любого (любых) из существующих (или планирующихся к разработке в будущем) наземных нагревных стендов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cohen MB, Moore RC, Golkowski M, Lehtinen NG. ELF/VLF wave generation from the beating of two HF ionospheric heating sources. *J. Geophys. Res.*, 2012, 117:A12310; doi: 10.1029/2012JA018140.
2. Ютло У, Коэн Р. Изменение ионосферы под действием мощных радиоволн. *УФН*, 1973, 109(2):371-387.
3. Алексапенко ВА, Дворников СИ, Дмитриев ВГ, Перунов ЮМ, Соловьёв АА, Терещенко ЕД. Активное воздействие на ионосферу сверхмощными наземными комплексами. *Вестник Академии военных наук*, 2004, 3(8):131-137.
4. Mingaleva GI, Mingalev VS. Response of the convecting high-latitude F layer to a powerful HF wave. *Ann. Geophysicae*, 1997, 15:1291-1300.
5. Гуревич АВ. Нелинейные явления в ионосфере. *УФН*, 2007, 177(11):1145-1177.
6. Moore RC, Inan US, Bell TF, Kennedy EJ. ELF waves generated by modulated HF heating of the auroral electrojet and observed at a ground distance of  $\sim 4400$  km. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112: A05309.
7. Barr R, Llanwyn Jones D, Rodger CJ. ELF and VLF radio waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 2000, 62: 1689-1718.
8. Cohen MB. ELF/VLF phased array generation via frequency-matched steering of a continuous HF ionospheric heating beam. *Ph. D. thesis*. Palo Alto, Stanford university, 2009, 213 p.
9. Bell TF, Inan US, Helliwell RA. Nonducted coherent VLF waves and associated triggered emissions observed on the ISEE 1 satellite. *J. Geophys. Res.*, 1981, 86:4649-4670.
10. Kimura I, Matsumoto H, Mukai T, Hashimoto K, Bell TF, Inan US, Helliwell RA, Katsufurakis JP. EXOS-B/Siple Station VLF wave-particle interaction experiments, 1, General description and wave-particle correlations. *J. Geophys. Res.*, 1983, 88:282-294.
11. Bell TF, Inan US, Kimura I, Matsumoto H, Mukai T, Hashimoto K. EXOS-B/Siple VLF wave-particle interaction experiments, 2, Transmitter signals and associated emissions. *J. Geophys. Res.*, 1983, 88:295-309.
12. Platino M, Inan US, Bell TF, Parrot M, Kennedy EJ.

- DEMETER observations of ELF waves injected with the HAARP HF transmitter. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33:L16101; doi: 10.1029/2006GL026462.
13. Мурлага А.Р. Решение обратной задачи мониторинга из космоса искусственных управляемых изменений состояния ионосферы на примере стенда HAARP. *Аннотации работ 9-го Всероссийского межотраслевого молодежного конкурса научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики»*. М., МАИ, 2017:228-231.
14. Мурлага А.Р. Мониторинг искусственных изменений в ионосфере со спутника: прямая и обратная задача. *Труды XI Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь»*. М., ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2017:10-12.
15. Гуреев Э.Д., Мурлага А.Р. Варианты построения спутниковой системы для мониторинга стенда HAARP. *Труды МАИ*, 2013, 65; <http://mai.ru/upload/iblock/861/861fe132228f739a4c673a57ecc9d195.pdf>.

**Замуруев Сергей Николаевич**

*д.т.н., доцент*

МИРЭА-Российский технологический университет

78, просп. Вернадского, Москва 119454, Россия

[zamuruev@mirea.ru](mailto:zamuruev@mirea.ru)

**Мурлага Алексей Ростиславович**

*ведущий инженер*

ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга

20/9, ул. Новая Басманная, Москва 107078, Россия

[myrlaga\\_olga@mail.ru](mailto:myrlaga_olga@mail.ru)

## SOME METHODS FOR SOLVING OF INVERSE PROBLEM CONSISTING IN MONITORING FROM SATELLITE OF ARTIFICIAL DISTURBANCES IN THE IONOSPHERE

**Sergey N. Zamuruev**

MIREA-Russian Technological University, <http://www.mirea.ru>

Moscow 119454, Russian Federation

[zamuruev@mirea.ru](mailto:zamuruev@mirea.ru)

**Aleksey R. Murlaga**

A.I. Berg Central Research Institute of Radioengineering, <http://www.cnirti.ru>

Moscow 107078, Russian Federation

[myrlaga\\_olga@mail.ru](mailto:myrlaga_olga@mail.ru)

*Abstract.* This paper is dealt with control from satellite of artificial disturbances in the ionosphere. Such disturbances can be excited by means of interaction of powerful radiation generated by earth-based heaters with the ionosphere. If next cut-in of a heater, periodicity of cut-ins, parameters of signals radiated by a heater (carrier frequency, modulation frequency, modulation format) are unknown and one has to design an orbit group capable to register primary radiation of a heater or products of its activity then such a problem is suggested to be referred to as inverse problem. A great number of orbit groups differing in parameters come out of solution of inverse problem. To choose the best solution (design of orbit group with optimal parameters) a model function allowing to give an integral description for orbit group and connecting external parameters of orbit group (information being acquired by orbit group from the heater, financial expenditure and period of time being required to deploy the orbit group) is synthesized. External parameters describe orbit group from customer's point of view. External parameters of orbit group are functions of its internal parameters (type and parameters of orbits, quantity of orbits, relative orientation of orbits, number of satellites pro a single orbit and their total number in the orbit group, arrangement of satellites for each orbit). Internal parameters describe orbit group from designer's point of view. Three criterions and appropriate methods for solution of inverse problem consisting in monitoring of earth-based heater are considered in this paper. This criterions and methods take into account the most widespread customer's limitations for external parameters of orbit group. A solution of inverse problem using criterion of heater's minimum non-observation is set forth as an example. This example shows that monitoring of primary radiation generated by a standard heater on conditions that a) one has no limitations in funding and time to deploy an orbit group, b) one can obtain no a priori data about heater's activity and c) one must provide non-stop monitoring of primary radiation generated by a heater, we obtain an orbit group consisting of eight satellites on high-elliptic orbit ("Molniya"-type) with longitude correction in 34°.

*Keywords:* modification of ionosphere; heater; inverse problem; satellite monitoring

UDC 629.783:551.535

*Bibliography* – 15 references

*РЭНСИТ*, 2018, 10(1):23-30

*Received* 05.04.2018

DOI: 10.17725/rensit.2018.10.023