

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.11>
УДК 621.396.67

МОДЕЛЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ КОСМИЧЕСКОМ РАДИОМОНИТОРИНГЕ

И. Е. Калмычков, А. М. Рахматулин, М. М. Тюстин
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Статья поступила в редакцию 12 августа 2020 г.

Аннотация. В статье представлена модель радиоэлектронной обстановки, учитывающая прием сигналов с наложением спектров. Рассматриваемая модель дополнена параметром, позволяющим повысить точность оценивания числа излучающих радиосредств при космическом мониторинге.

Ключевые слова: радиоэлектронная обстановка, наложение спектров, излучающие радиосредства, угол прихода электромагнитной волны.

Abstract. The article presents a model of the electronic environment, taking into account the reception of signals with aliasing. The model under consideration is supplemented with a parameter that makes it possible to increase the accuracy of estimating the number of emitting radio equipment in space monitoring.

Keywords: electronic environment, aliasing signals, emitting radio equipment, angle of arrival of the electromagnetic wave.

Введение

Проблема ограниченного частотного ресурса послужила причиной появления и развития радиосистем, функционирующих по принципу повторного использования частот или одновременного использования одной частоты несколькими абонентами. К таким системам можно отнести системы сотовой связи, систему идентификации морских судов (AIS – Automatic Identification System), а также систему радиовещательного автоматического зависящего наблюдения (ADS-B – Automatic surveillance-broadcast) и др.

В настоящее время для контроля параметров подобных систем в интересах обеспечения электромагнитной совместимости радиосредств используются системы наземного радиомониторинга. Существенным недостатком таких систем в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ является ограниченная зона радиовидимости. Это не позволяет применять наземные системы для реализации концепции глобального, экстерриториального радиомониторинга.

Одним из путей решения подобной проблемы является применение для радиомониторинга космических систем, обеспечивающих одновременный охват значительной территории. В частности, применение низкоорбитальных систем космических аппаратов существенно расширит возможности радиомониторинга за счет периодического наблюдения районов земной поверхности, недоступных для наземных систем.

В качестве важного дополнительного свойства низкоорбитальных космических систем в сравнении с наземными стационарными системами следует выделить движение приемных пунктов относительно контролируемых источников радиоизлучения (ИРИ). Это порождает ряд физических эффектов, применение которых может быть использовано при радиомониторинге систем, функционирующих по принципу повторного или одновременного использования частотного ресурса, что в условиях космического радиомониторинга приводит к приему сигналов с наложением спектров.

Следует отметить, что важной задачей радиомониторинга подобных систем является определение числа радиоэлектронных средств одновременно использующих общий частотный ресурс. Так для систем сотовой связи результатом решения такой задачи является число базовых станций, работающих в пределах контролируемой территории. В свою очередь для систем AIS и ADS-B результатом решения задачи радиомониторинга будет состоять в определении числа участников воздушного или морского движения. Полученные сведения могут быть использованы для повышения эффективности распределения частотного ресурса или для развития инфраструктуры, повышающей надежность и качество функционирования

радиосистем. Это обуславливает высокие требования к системам радиомониторинга по оцениванию числа ИРИ, в том числе, функционирующих по принципу повторного или одновременного использования частотного ресурса.

1. Формулировка цели исследования

В существующих работах, посвященных исследованию систем радиомониторинга, сигнально-помеховая обстановка описывается следующим выражением [1-3]

$$u_{\text{вх}}(t) = \varepsilon(t) + \sum_{k=1}^K u_k(t, f_k, df_k), t \in (0; T), \quad (1)$$

где $u_{\text{вх}}(t)$ – случайный процесс, формируемый в полосе пропускания радиоприемного устройства (РПУ) системы радиомониторинга при одновременном приеме K радиосигналов;

$\varepsilon(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) в полосе пропускания РПУ;

f_k – центральная частота спектра радиосигнал $u_k(t)$;

df_k – ширина спектра радиосигнала $u_k(t)$;

T – время наблюдения.

Следовательно, формальная математическая постановка задачи радиомониторинга сводится к оцениванию числа K по результатам наблюдения случайного процесса $u_{\text{вх}}(t)$ в течение интервала времени T .

В работах [1-3] представлены методы решения этой задачи, основанные на разделении радиосигналов по некоторым отличительным признакам. Так в работе [2] предлагается для разделения сигналов использовать их статистические модели. Однако такой подход в условиях случайно изменяющейся сигнально-помеховой обстановки требует большего числа функций правдоподобия, учитывающих все возможные значения параметров сигналов $u_k(t, f_k, df_k)$, а также их число в полосе пропускания РПУ.

В работе [1] предложено разделять радиосигналы на основе использования спектральной оценки процесса $u_{\text{вх}}(t)$. Такой подход успешно применяется при

условии, что радиосигналы занимают разные полосы частот без их перекрытия. Однако, предметом исследования настоящей работы являются радиосистемы, функционирующие по принципу повторного или одновременного использования частотного ресурса, удовлетворяющие условию

$$f_k = f_{k+1} \wedge df_k = df_{k+1}, k \in (1, \infty) \wedge k \in \mathbb{Z}, \quad (2)$$

что не позволяет использовать методы на основе спектральной оценки применительно к исследуемым системам.

Решение задачи разделения сигналов, с пересекающимися амплитудными спектрами представлено в работе [3]. Основу решения составляет метод оценивания направления прихода электромагнитной волны каждого источника радиоизлучения, формирующего $u_{\text{вх}}(t)$. В этом случае аналитическая модель (1) дополняется специальным множителем, характеризующим изменение амплитуды сигнала на разных элементах антенной системы (АС)

$$u_{\text{вх}}(t) = \varepsilon(t) + \sum_{k=1}^K u_k(t, f_k, df_k, A(\theta, \beta)), t \in (0; T), \quad (3)$$

где $A(\theta, \beta)$ – матрица размерности $M \times K$, характеризующая набеги фаз на элементах АС с учетом ее заданной геометрии и вида обрабатываемого радиосигнала, где M – количество элементов АС.

В частности элемент матрицы $A(\theta, \beta)$ для линейной АС с фазовым центром, расположенным на первом элементе, имеет вид [3]

$$a_{m,k}(\theta_k, \beta_k) = F_m(\theta_k, \beta_k) \exp\left(j\left(\varphi_0 + (m-1)\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)d \cos(\theta_k) \cos(\beta_k)\right)\right), \quad (4)$$

где m – номер элемента АС;

$F_m(\theta_k, \beta_k)$ – диаграмма направленности m -го элемента АС;

φ_0 – начальная фаза сигнала в фазовом центре;

λ – длина волны сигналов, излучаемых ИРИ;

d – расстояние между соседними элементами линейной АС;

θ_k – азимут на k -й ИРИ;

β_k – угол места на k -й ИРИ.

Метод, разработанный в работе [3], может использоваться для радиосигналов с целью оценивания их числа при выполнении условия

$$d\theta \leq |\theta_k - \theta_{k+1}| \vee d\beta \leq |\beta_k - \beta_{k+1}|, \quad (5)$$

где $d\theta$ и $d\beta$ – разрешающая способность по азимуту и углу места на ИРИ соответственно.

Однако, если условие (5) не выполняется, то полученная оценка будет ошибочной. Следует отметить, что при движении космического аппарата радиомониторинга всегда существует момент времени t' , при котором это условие (5) будет выполняться (рисунок 1).

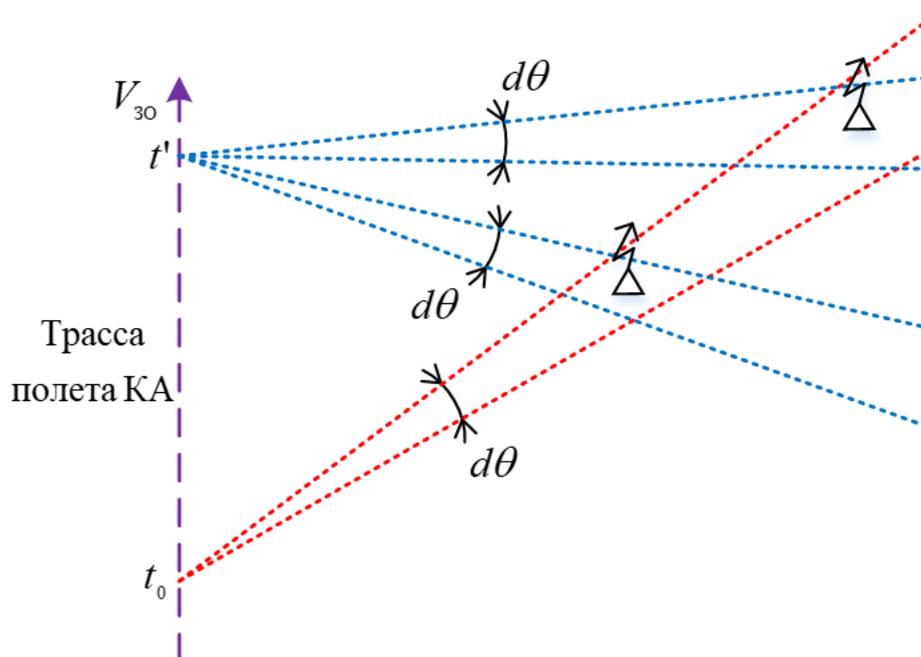


Рис. 1. Схематическое представление оценивания азимутов на ИРИ в различные моменты времени.

Таким образом, свойство движения приемного пункта относительно контролируемых ИРИ, характерное для низкоорбитальных космических систем, можно использовать для повышения точности оценивания их числа.

Целью исследования, представленного в статье, является дополнение аналитической модели (1) параметром, оценивание которого повысит точность определения числа ИРИ, формирующих сигнально-помеховую обстановку в полосе пропускания РПУ, за счет свойства движения космического аппарата (КА) низкоорбитальных систем относительно ИРИ.

2. Параметры радиосигналов, позволяющие оценить число ИРИ, в условиях приема КА радиомониторинга смеси сигналов с наложением спектров

Из рисунка 1 следует, что для решения сформулированной задачи аналитическая модель (1) должна быть дополнена параметром, характеризующим изменение угла прихода электромагнитной волны (ЭМВ) при движении космического аппарата относительно ИРИ. Это позволит разделить радиосигналы с целью определения их числа в случайном процессе $u_{\text{вх}}(t)$, в том случае, когда условие (5) в момент времени t не может быть выполнено.

Физический аспект оценивания числа ИРИ в условиях наложения спектров рассмотрим на примере регистрации комплексных амплитуд на элементах некоторой линейной АС, состоящей из четырех элементов с фазовым центром на крайнем элементе. Для этого проведем имитационное моделирование на основе формул (3) и (4). В качестве допущения полагаем, что несущие частоты колебаний одинаковы, а начальные фазы сигналов и углы места на ИРИ равны нулю.

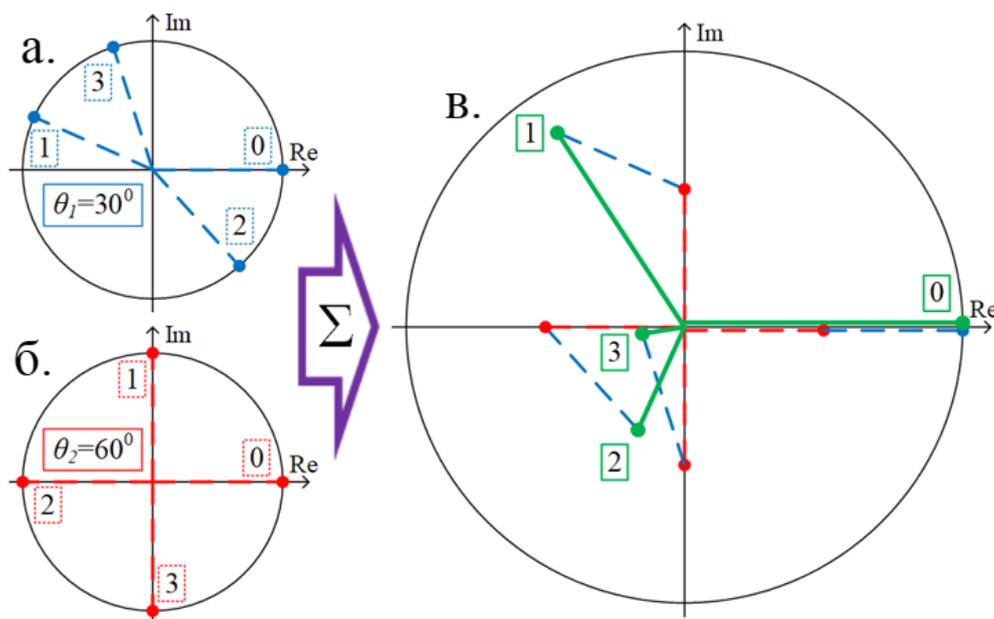


Рис. 2. Сложение комплексных амплитуд на выходах элементов АС при различных азимутах на ИРИ (а – для сигнала 1 ИРИ с $\theta_1=30^0$, б – для сигнала 1 ИРИ с $\theta_2=60^0$, в – для суммы сигналов 2 ИРИ с $\theta_2=30^0+60^0$).

Все ИРИ излучают гармонические сигналы. Значения азимутов выбраны, исходя из условия $(\theta_1 + \theta_2)/2 = \theta_\Sigma$. Поскольку частота сигналов одинаковая, то их сумма является гармоническим сигналом. Следовательно, сумма сигналов, излучаемых парой ИРИ, должна соответствовать гармоническому сигналу, имеющему азимут $\theta_\Sigma = 45^\circ$ и относительную амплитуду $u_\Sigma = 2$. Однако этого не происходит (рисунок 2). Следовательно, на основе комплексной огибающей выходов элементов АС можно оценить количество ИРИ, их азимуты и амплитуды излучаемых сигналов.

Как известно, вследствие движения КА по орбите, его зона обзора (ЗО) радиусом R_{30} с центром в подспутниковой точке перемещается относительно Земной поверхности со скоростью V_{30} . При невозмущенном движении КА V_{30} для круговой орбиты является постоянной, поэтому азимут на ИРИ меняется относительно первоначального $\theta(t_0)$, в отличие от угла места на ИРИ (рисунок 3).

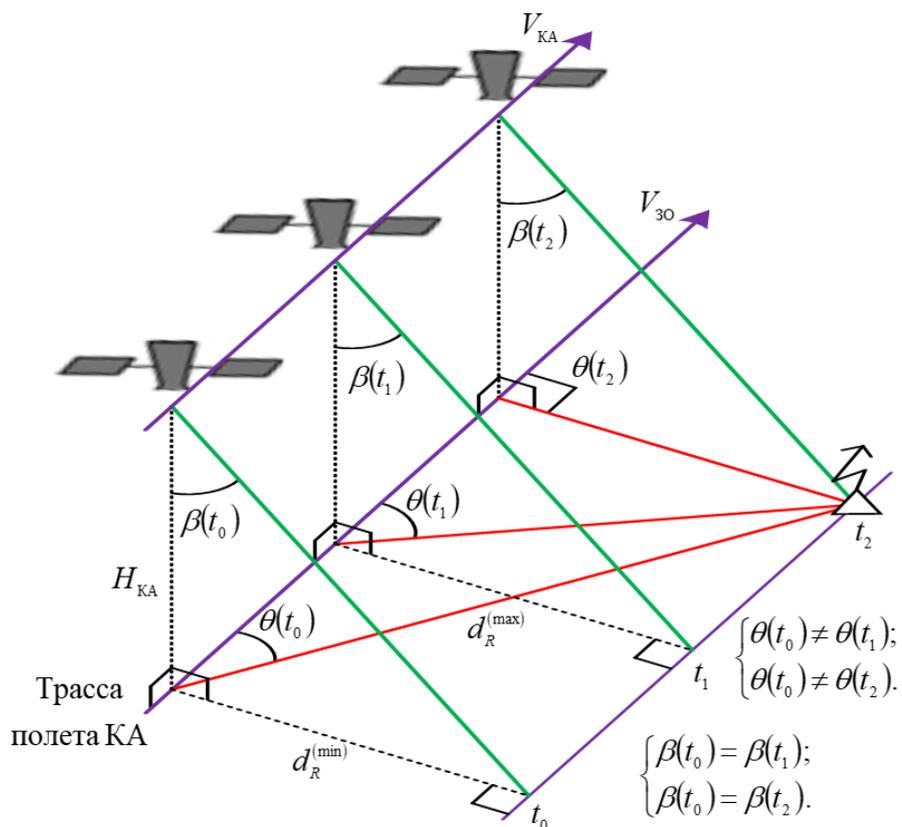


Рис. 3. Схематическое изображение изменения азимута на ИРИ за сеанс радиомониторинга.

При этом в момент времени t значение θ определяется следующим выражением

$$\theta(t) = \begin{cases} \arctg\left(\frac{R_{30} \sin(\theta(t_0))}{R_{30} \cos(\theta(t_0)) - V_{30}t}\right), & \text{при } R_{30} \cos(\theta(t_0)) > V_{30}t; \\ 90^\circ, & \text{при } R_{30} \cos(\theta(t_0)) = V_{30}t; \\ 180^\circ + \arctg\left(\frac{R_{30} \sin(\theta(t_0))}{R_{30} \cos(\theta(t_0)) - V_{30}t}\right), & \text{при } R_{30} \cos(\theta(t_0)) < V_{30}t. \end{cases} \quad (6)$$

Для иллюстрации изменения азимута (рисунок 4) за сеанс радиомониторинга для различных начальных углов прихода ЭМВ проведено имитационное моделирование при следующих начальных условиях:

- тип орбиты – круговая с высотой $H_{КА} = 1000$ км;
- $V_{30} = 6,356$ км/с;
- $R_{30} = 100$ км.

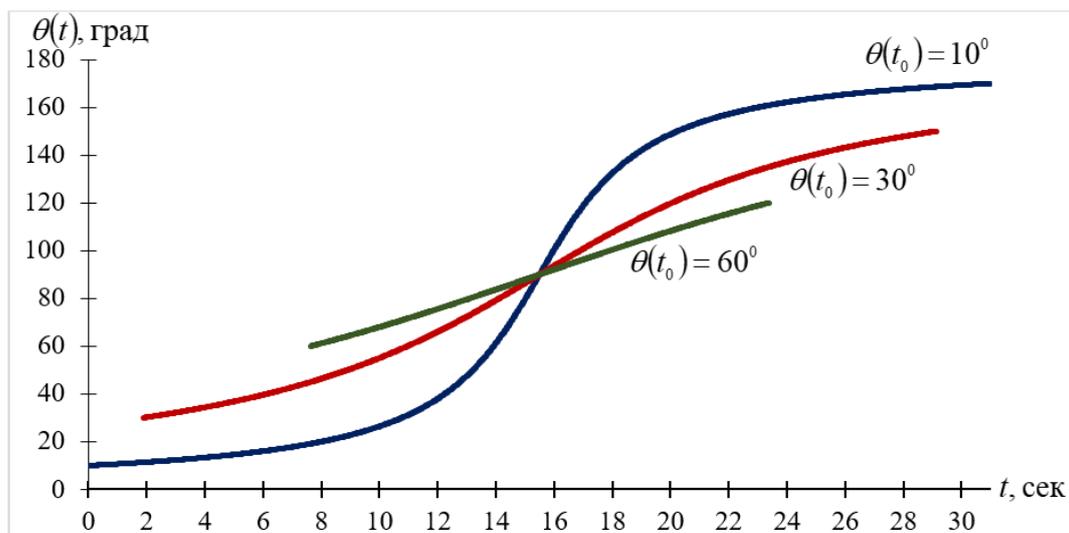


Рис. 4. Изменение азимута на ИРИ за сеанс радиомониторинга.

Ввиду априорной неопределенности о местоположении ИРИ относительно подспутниковой точки КА, предположим, что в момент времени t_0 радиоэлектронное средство находится на границе ЗО КА. Это соответствует наихудшему случаю.

Следовательно, исходя из условия (5), необходимо найти максимальное время, за которое азимут на ИРИ изменится на величину $d\theta$ относительно $\theta(t_0)$. Подставляя в выражение (6) равенство $\theta(t)=d\theta$, получим

$$t^{(\max)}(\theta(t_0), d\theta) = \frac{R_{30} |\cos(\theta(t_0))| - \frac{R_{30} \sin(\theta(t_0))}{\operatorname{tg}(\theta(t_0) + d\theta)}}{V_{30}}. \quad (7)$$

В результате имитационного моделирования, получены зависимости максимального времени, необходимого для изменения азимута на ИРИ относительно $\theta(t_0)$ на величину $d\theta$ за сеанс радиомониторинга (рисунок 5). При моделировании приняты следующие начальные условия:

- $V_{30} = 6,356$ км/с;
- $R_{30} = 100$ км.

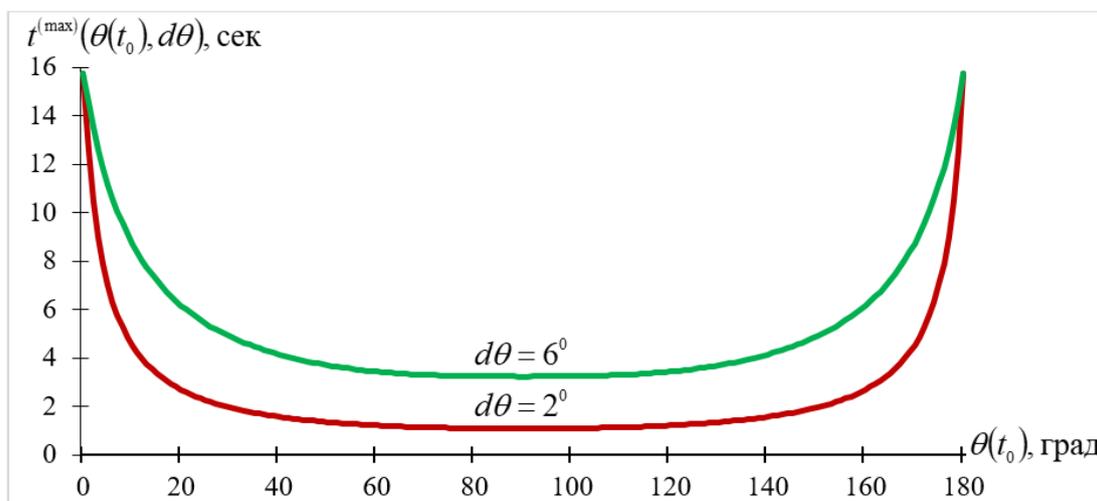


Рис. 5. Зависимость максимального времени, необходимого для изменения азимута от исходного на величину $d\theta$ за сеанс радиомониторинга.

Таким образом, модель радиоэлектронной обстановки, в общем виде представленную выражением (1), для космического радиомониторинга целесообразно дополнить параметром $A(\theta(t))$, характеризующим изменение азимута на ИРИ при движении КА радиомониторинга. Тогда случайный процесс $u_{\text{вх}}(t)$ будет иметь вид отличный от (1)

$$u_{\text{вх}}(t) = \varepsilon(t) + \sum_{k=1}^K u_k(t, f_k, df_k, A(\theta(t))), t \in (0, T). \quad (8)$$

Следовательно, параметр $A(\theta(t))$ является дополнительным параметром, позволяющим повысить точность оценивания числа ИРИ, функционирующих по принципу повторного или одновременного использования частотного ресурса.

Вывод

Результаты исследования, представленные в статье, позволяют сформулировать следующее научное положение – модель радиоэлектронной обстановки, учитывающая изменение азимута на ИРИ при движении космического аппарата, позволяет повысить точность оценивания числа ИРИ в условиях приема смеси сигналов с наложением спектров.

Литература

1. Рембовский А.М., Ашхимин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под редакцией А.М.Рембовского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 492 с.: ил. – ISBN 5-93517-326-3.
2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. / Б. Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.: ил. – ISBN 5-256-00264-3.
3. Плотуха П.А. Исследование методов решения некорректных задач многосигнальной радиопеленгации на одной частоте: дис... канд. техн. наук: 05.13.01: защищена 20.10.2009 / Плотуха Павел Анатольевич – М., МГТУ им. Н.Э.Баумана.2009. – 184 с.

Для цитирования:

Калмычков И.Е., Рахматулин А.М., Тюстин М.М. Модель радиоэлектронной обстановки при космическом радиомониторинге. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.11>