

**ПРИЕМНЫЙ ПУНКТ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА  
ОБЪЕКТАМИ “КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА”  
НА БАЗЕ РАДИОТЕЛЕСКОПА РТ-70**

<sup>1</sup>Коноваленко А.А., <sup>2</sup>Волощук Ю.И., <sup>2</sup>Горелов Д.Ю., <sup>1</sup>Литвиненко Л.М., <sup>2</sup>Нестеренко Г. В.,  
<sup>2</sup>Семенов С.Ф., <sup>2</sup>Соляник О.А., <sup>2</sup>Татарец Л.П., <sup>1</sup>Фалькович И.С., <sup>2</sup>Шелковенков Д.А.,  
<sup>2</sup>Шкарлет А.И.

<sup>1</sup>Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України (ІН НАНУ),  
Україна, 61002, м. Харків, вул. Червонопрапорна,4, тел. +(380) 057-706-14-10  
факс: (057)-706-14-15, E-mail: falk@ira.kharkov.ua

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14; тел: +(380) 57-700-22-84,  
факс: +(380) 57-702-10-13  
E-mail: secort@kture.kharkov.ua

The problem of developing methods and means for measuring dynamic (orbital) characteristics of space debris is rather actual at present. The system, based on RT-70 radio telescope may serve as a basic link for space debris monitoring in Ukraine. It is necessary to have several remote points in order to assess the orbits elements where space debris objects are moving. One of such points is located on Balakleya Scientific and Research Testing Ground of Kharkiv National University of Radioelectronics. The receiving point comprises receiving parabola dia 4 m., low-noise receive path as well as the signal processing system that allow assessing distance, velocity and dimensions of space debris elements.

The report reviews basic principles of receiving point architecture and assesses its capabilities.

В настоящее время в Украине не существует радиолокационного комплекса определения характеристик объектов космического мусора (ОКМ) на низких и геостационарных орбитах. В то же время, в США получены практически все данные о параметрах орбит и плотностях потоков ОКМ для западного полушария; по восточному полушарию имеет место недостаток экспериментальных данных. На основе радиотелескопа РТ-70 (Крым), малощумящего приемника и параболической антенны изготовленной с использованием антенной системы СТВ-4, которая первоначально была предназначена для приема телевизионных программ с геостационарных спутников-ретрансляторов (Балаклейский научно - исследовательский полигон ХНУРЭ БНИП ХНУРЕ), создается украинский комплекс мониторинга низкоорбитального космического мусора. Потенциал такого комплекса будет уступать более мощным американским системам, однако он может стать тем инструментом, на котором будут отработаны методики наблюдений, выбраны оптимальные сигналы для решения тех или иных задач исследования ОКМ, разработаны и проверены как алгоритмы обработки принятых сигналов, так и программное обеспечение для расчета элементов орбит и решения других задач.

Задача создания приемного комплекса, предназначенного для наблюдением за ОКМ, может быть условно разделена на две подзадачи. Первая из них – оценка потенциальных возможностей радиолокационного комплекса для обнаружения ОКМ (передающая станция – РТ-70, Евпатория; приемный пункт – Балаклея). Для решения этой подзадачи использован метод моделирования. Вторая подзадача работы - создание системы приема сигналов частоты 5010 МГц, которая в перспективе должна обеспечить регистрацию сигналов, отраженных от ОКМ.

Для определения потенциала проектируемого комплекса (потенциальной вероятности регистрации количества ОКМ в час) использована к полуэмпирическая модель ORDEM 2000 [1], которая позволяет оценить средний поток (количество штук в кубическом километре за год) ОКМ через диаграмму направленности (ДН) радиолокационного комплекса.

Полученные зависимости плотности потока объектов космического мусора (количество штук в кубическом километре за секунду) от высоты для размеров ОКМ (более 1 см, 10 см и 1м) дали следующие результаты: максимум потока частиц с размерами более 1 см для всех трех зависимостей приходится приблизительно на высоту  $h = 850 \dots 950$  км и приблизительно равен  $7 \cdot 10^{-7}$  (штук/км<sup>3</sup> в секунду). Максимум потока для частиц с размерами более 10 см приходится на диапазон высот  $h = 800 \dots 1000$  км и равен  $3 \cdot 10^{-8}$  (штук/км<sup>3</sup> в секунду).

Схематически геометрия построения комплекса исследования ОКМ на низких орбитах представлена на рис. 1. Здесь  $R$  – длина базы между пунктами А (РТ-70) и В (БНИП ХНУРЭ), база – расстояние между приемным и передающим пунктом –  $R = 540$  км. Углы  $\alpha$  и  $\gamma$  определяют ширину диаграммы направленности антенны передающего устройства – РПУ (РТ-70) – и приемного устройства – РПрУ – соответственно. База  $R$  и углы  $\beta$  и  $\phi$  определяют координаты точки  $O$  – центра исследуемой области, получаемой пересечением осевых лучей диаграмм направленности РПУ и РПрУ.

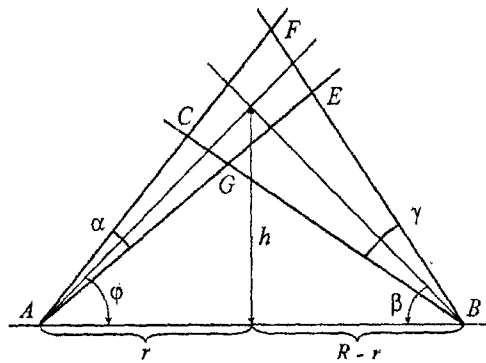


Рис. 1.

Размер исследуемого объема для высот 200...1050 км, в случае если ДН антенн ориентируются над средней точкой базы, составляет 50...420 км<sup>3</sup>.

Для оценки кинематических характеристик объектов космического мусора, которые могут регистрироваться проектируемым комплексом, решалась задача астродинамики для двух тел [2]. Анализ полученных данных показал, что для области пространства, ограниченной ДН передающей и приемной антенн, приблизительно 99.5% ОКМ сосредоточено в интервале скоростей 7...8 км/с, движущихся по орбитам с эксцентриситетом до  $e = 0.3$ , а их радиальная скорость – 2000 м/с, что соответствует максимальной доплеровской частоте  $\approx 67$  кГц.

По формуле радиолокации определим минимальные размеры потенциально обнаруживаемых комплексом ОКМ. Максимальная дальность до исследуемого объекта, определяется по формуле [4]:

$$D^4 = R_n^2 R_{np}^2 = \frac{P_n T_n G_n G_{np} \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_{np} (Ш + \frac{T_s + T_r}{T_{np}} - 1) L q}; \quad \text{где } q \text{ – отношение сигнал/шум на выходе}$$

де оптимального фильтра, достаточное для уверенного обнаружения объекта локации, принимаем значение  $q$  равным 3 дБ;  $\sigma$  – эффективная площадь рассеяния цели;  $T_{np}$  – температура окружающего пространства,  $T_{np} = 300$  К;  $Ш$  – коэффициент шума приемника  $Ш = 5$ ;  $T_s$  – шумовая температура космического пространства, на частоте 5010 МГц равна 50 К;  $T_r$  – шумовая температура радиоприемного устройства; суммарная температура антенны и приемного тракта комплекса составляет  $\approx 120^{\circ}\text{K}$ ;  $L$  – потери в тропосфере, за счет некогерентности накопления импульсов, неоптимальности полосы пропуска-

ния УПЧ, неоптимальности частотных характеристик входного тракта, потерь квантования и дискретизации при цифровой обработке принимаем  $\approx 15$  дБ; для достижения регистрации максимума потока ОКМ точка пересечения ДН передающей и приемной антенн должна находиться на уровне  $900 \div 950$  км, что соответствует условию когда  $R_{np} = 900$  км, а  $R_{pr} = 1050$  км; время накопления  $T_n$  принятого сигнала, рассчитанное на основе средней длины пролета ОКМ через исследуемую область, для 95,5% орбит составляет  $\approx 0.24$  с,  $P_n = 50$  кВт.

Приведенные характеристики приемного пункта комплекса регистрации низкоорбитальных ОКМ позволяют регистрировать частицы диаметром больше  $\approx 1.5$  см, при потенциальной средней численности регистраций 14.7 шт/час.

Первый этап второй подзадачи - создание приемного комплекса (ПК), который был бы способен вести прием, предварительную обработку и регистрацию сигналов космических радиоисточников. Одним из основных элементов приемного ПК является параболическая антенна. Конструкция параболического зеркала, изготавливаемого по высокоточной технологии из алюминиевых сплавов, обеспечивает высокие электротехнические параметры и отличные эксплуатационные качества. Допуски поверхности антенны позволяют ее использовать в диапазоне частот до 11.75 ГГц. Эта антенна установлена на кабине ПК и имеет возможность вращаться по азимуту на угол  $0^\circ \dots 360^\circ$ , а угломестное перемещение зеркала в пределах  $(0 \dots 90^\circ)$  осуществляется с помощью редуктора. Отражающая поверхность зеркала представляет собой сплошную поверхность. Фокусное расстояние параболического зеркала равно 1146 мм. С наружной стороны антенна имеет жесткий каркас, позволяющий поддерживать заданный профиль зеркала. У основания параболоида имеется опорное кольцо, которое крепится к поворотному угломестному приводу. Для возбуждения антенны конструктивно предусмотрено использование одного из двух типов облучателей, которые располагаются вдоль оси симметрии антенны: один на базе круглого волновода, а другой на базе волновода прямоугольного сечения. Первый тип используемого облучателя состоит из дюралюминиевой трубы - круглого волновода с использованием основного типа волны  $H_{11}$  и имеет отражающий диск диаметром 150 мм, который располагается перед открытым концом волновода с помощью диэлектрического стакана. Возбуждение волновода осуществляется с помощью штыря, расположенного на расстоянии  $\lambda/4$  от короткозамкнутого конца волновода. Вторым типом облучателя является стандартный волновод прямоугольного сечения работающий на основном типе волны  $H_{10}$ , который заканчивается полуволновым вибратором и директором. Оба облучателя в рабочей полосе частот имеют КСВ  $< 1.5$ .

Внешний вид кабины ПК с установленной на ней антенной приведен на рис. 2.

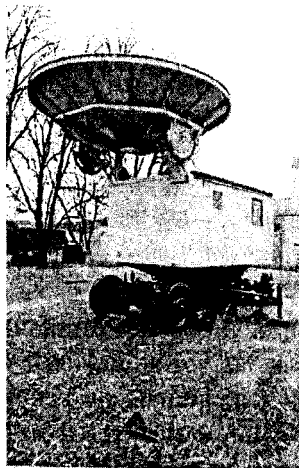
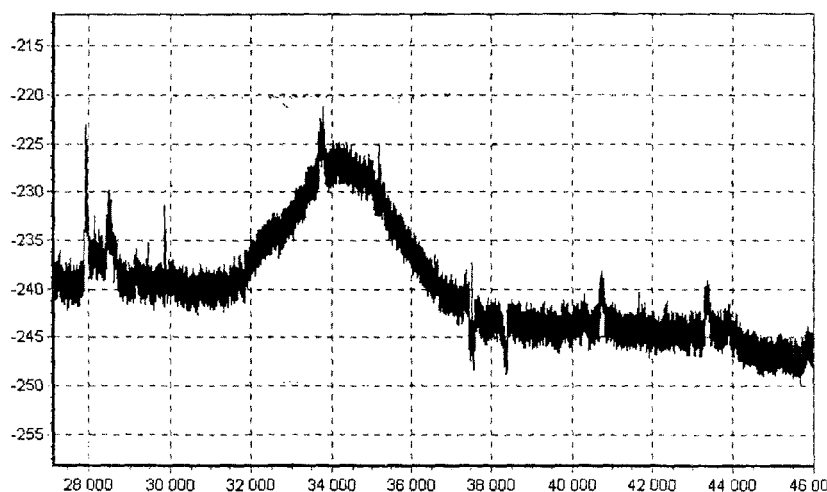


Рис. 2.

Для локации объектов космического мусора необходимо одновременное наведение двух существенно разнесенных в пространстве антенн в заданный объем околоземного пространства. Чтобы установить соответствие между направлением максимума ДН антенны и показаниями координатной системы ПК, был принят метод юстировки, использующий радиоизлучение космического источника (КИ), в частности, Кассиопеи-А. Это позволило отработать методику измерений и калибровки приемного тракта, отладить программы обработки сигналов в режиме радиометра (оцифровка принятых сигналов радиометра, цифровая их обработка – фильтрация, накопление, и т.д.). Для приема сигналов КИ на стадии отладочных работ, реализующих прием сигналов на частоте первой промежуточной частоты ПК использовалась параболическая антенна диаметром 5.5 м, которая по своим конструктивным особенностям позволяла работать в диапазоне частот первой промежуточной частоты ПК (450...625МГц) в пределах черты города (ХНУРЭ). Проведенные измерения помеховой обстановки с помощью сканирующего приемника фирмы IC-COM модель IC-PCR 100 выявили, что в диапазоне частот 490 МГц существует окно свободное от помех в полосе частот 1 МГц. С августа по ноябрь 2004 года были проведены круглосуточные измерения. Во время этих наблюдений Кассиопея –А проходила через ДН антенны в ночное время суток и поэтому помехи не оказывали существенного влияния на результаты измерений.

На рис. 3 представлена одна из регистраций прохождения Кассиопеи А через ДН антенны. По оси ординат отложены показания, получаемые с помощью аналогово-цифрового преобразователя, а по оси абсцисс – время в секундах, начиная от времени включения измерений. В представленной регистрации приращение антенной температуры составило примерно  $15.6^{\circ}$  над уровнем фона.

Начало измерений >>> Дата: 30.10.04 Время: 11:18:47



**-202,446**

Рис. 3.

В течение всего цикла было зарегистрировано около 40 сеансов прохождения радиоисточника Кассиопея-А через ДН антенны и тракт ПЧ ПК (490МГц).

На рис.4 представлена усредненная ДН параболической антенны диаметром 5.5 м за 10 сеансов измерений и совмещении по времени времени кульминации. Согласно проведенных измерений и обработки полученных результатов можно считать, что ширина ДН на уровне половинной мощности составила  $6^{\circ}13'$  при расчетном значении  $7^{\circ}17'$ .

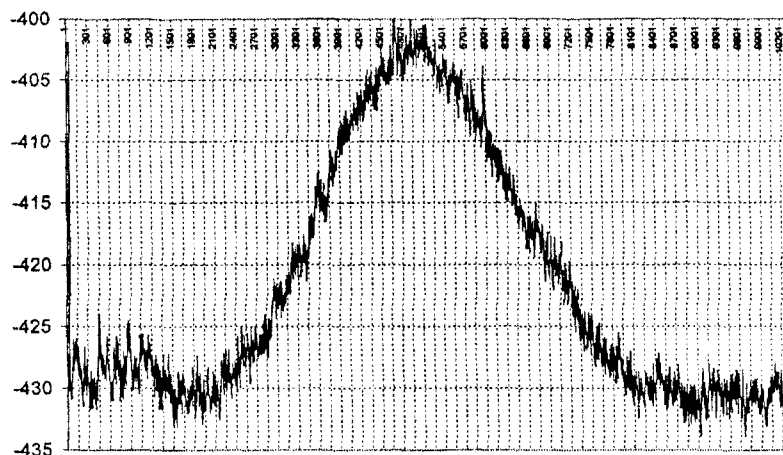


Рис. 4.

Данные измерения позволили отладить приемную аппаратуру и программные средства. Положительным фактором использования частоты 490 МГц явилось, кроме уже отмеченного, также то, что спектральная плотность потока радиоизлучения Кассиопеи-А на этой частоте примерно в 7 раз больше, чем на частоте 5010 МГц, что, естественно, облегчило решение тех задач, которые были поставлены при проведении этого эксперимента.

Таким образом, можно считать, что приемный комплекс позволяет надежно регистрировать космические радиоисточники. Для того, чтобы проводить измерения параметров ОКМ, необходимо решить еще ряд достаточно сложных задач: обеспечить синхронизацию приемного пункта с передающим; разработать и изготовить аппаратное, алгоритмическое и программное обеспечение вторичной обработки уже не радиометрических, а радиолокационных сигналов ОКМ, программ для оценки элементов орбит объектов и др. Необходимо также решить ряд организационных вопросов, связанных с проведением таких измерений.

#### Литература

1. The new NASA orbital debris engineering model ORDEM2000. Web Site at: <http://neo.jpl.nasa.gov>.
2. Херрик С. Астродинамика. Пер. с английского под. ред. В.А. Сарычева. – М.: Мир, 1976. – 318 с.
3. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы и математическая обработка данных. Коллектив авторов, под. ред. Агаджанова П.А., Дулевича В.Е., Коростелева А. А. – М.: Советское радио, 1969. – 504 с.
4. Ширман Я.Д., Голиков В.Н. Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров. – М.: Советское радио, 1962. – 203 с.