

**Я.Н. ЧЕПУРНЫЙ**, гл. инж., Институт ионосферы, Харьков;  
**А.И. ЛЯЛЮК**, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

## ОЦЕНКА УРОВНЯ ПОМЕХ ОТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА РАДАРЕ НР С АНТЕННОЙ НДА-100

В статье произведена оценка уровня и времени воздействия помех, обусловленных отражениями от космического мусора при проведении ионосферных измерений на радаре НР с антенной НДА-100.

**Ключевые слова:** радар некогерентного рассеяния, измерения ионосферных параметров, космический мусор, уровень помех.

**Введение.** К космическому мусору относят все искусственные объекты и их фрагменты в космическом пространстве, которые уже неисправны и невозстановимы. С начала освоения космического пространства его количество непрерывно увеличивается [1].

На рис. 1 приведена зависимость количества каталогизированных объектов на низких (высотой до 2000 км) околоземных орбитах с 1957 по 2012 гг. [2]. Видно, что с 1972 г., когда были начаты измерения ионосферных параметров методом некогерентного рассеяния (НР) в Харькове, число только наиболее крупных космических объектов, включенных в каталоги, выросло более чем в 4.5 раза.



Рис. 1 – Количество каталогизированных объектов на низкой околоземной орбите

Пространственное распределение каталогизированных объектов по состоянию на конец 2010 г. представлено на рис. 2 [3]. Максимальная пространственная плотность космических объектов наблюдается вблизи высот орбиты 700 – 1000 км. Значительный вклад в и без того высокую плотность на этих высотах внесли два события: столкновение космических

аппаратов Космос-2231 и Иридиум-33 10 февраля 2009 г., а также уничтожение китайскими средствами противоракетной обороны спутника Фэньюнь-1С 11 января 2007 г. Второй максимум находится на высотах 1400 – 1550 км.

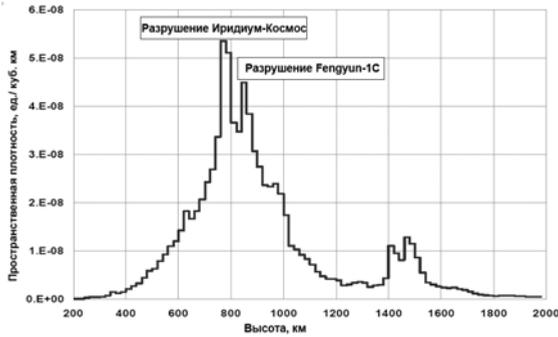


Рис. 2 – Пространственная плотность каталогизированных объектов на низкой околоземной орбите

Некаталогизированные объекты космического мусора имеют размеры 10 см и менее, часть их фиксируется средствами наблюдения. Оценки же общего количества и плотности их распределения на орбите делаются на основе различных моделей. На рис. 3 приведены, основанные на моделях значения существующей пространственной плотности мелких некаталогизированных объектов [4]. Данные соответствуют 1999 г.



Рис. 3 – Пространственная плотность мелких некаталогизированных объектов на низкой околоземной орбите

Отражения от космического мусора создают помехи при измерениях ионосферных параметров методом НР на высотах 100 – 2000 км. Значительно

возросший в последние годы уровень этих помех требует применения специальных методов обработки результатов ионосферных измерений.

**Целью настоящей работы** является оценка уровня и времени воздействия помех, обусловленных отражениями от космического мусора при проведении ионосферных измерений на радарх НР с антеннами НДА-100 и ППА-25.

**Основные расчетные соотношения.** Мощность отраженного от космического объекта сигнала, принимаемая антенной, равна [5]

$$P_{\text{отр}} = \frac{P_{\text{пер}} G_a S_{\text{отр}} A_{\text{эфф}}}{16\pi^2 r^4}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{пер}}$  – импульсная мощность передатчика,  $G_a$  – коэффициент усиления антенны,  $S_{\text{отр}}$  – эффективная отражающая площадь объекта,  $A_{\text{эфф}}$  – эффективная площадь антенны,  $r$  – расстояние до объекта.

Мощность шума определяется как [5]

$$P_{\text{ш}} = kT_c \Delta f, \quad (2)$$

где  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T_c$  – шумовая температура системы,  $\Delta f$  – полоса пропускания приемника.

Эффективная площадь, соответствующая усилению по главному и боковым лепесткам ДН, определяется из соотношения [6]

$$A_{\text{эфф}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_a, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны радара НР.

Для привязки результатов вычислений к данным о количестве объектов космического мусора, будем полагать, что рассматриваемые объекты являются металлическими сферами диаметром  $l$ . Тогда эффективная отражающая площадь объекта [7]

$$S_{\text{отр}} = 690 \frac{l^6}{\lambda^4}, \quad (4)$$

где  $\lambda = 1.9$  м – рабочая длина волны радара НР.

Определим время пролета объектов через главный лепесток ДН антенны, а также отсчитывая её ширину по уровням соответствующих боковых лепестков. Для этого воспользуемся соотношениями для скорости  $V$  и периода обращения  $T$  космического объекта в предположении невозмущенной круговой орбиты [8]:

$$V = \sqrt{\frac{\mu_0}{R}}, \quad (5)$$

$$T = 2\pi R/V, \quad (6)$$

где  $\mu_0 = 3.98602 \times 10^{14}$  м<sup>3</sup>/с<sup>2</sup> – гравитационный параметр Земли,  $R$  – радиус орбиты объекта, отсчитываемый от центра Земли. Для вычисления времени

пролета объекта через ДН необходимо пересчитать ширину сечения ДН на высоте  $h$  (отрезок BC на рис. 4) в центральный угол  $\alpha$ .

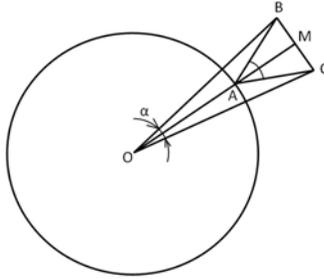


Рис. 4 – К определению центрального угла  $\alpha$

Из геометрических соотношений, показанных на рис. 4 можно найти, что

$$\alpha = 2 \arctg \left( \frac{h}{R_3 + h} \operatorname{tg} \theta \right), \quad (7)$$

где:

$\theta$  – угол  $MAC$ , равный половине ширины ДН антенны по заданному уровню;  
 $h = AM$  – высота орбиты космического объекта над поверхностью Земли;  
 $R_3 = 6371$  км – радиус Земли.

Время пролета объекта через ДН антенны равно

$$t_{\text{пр}} = T\alpha/360, \quad (8)$$

где  $T$  – период обращения объекта,  $\alpha$  – угол в градусах.

Допустим, что космический мусор распределен вокруг Земли равномерно. Тогда, используя информацию о количестве объектов  $N$  и ширине ДН антенны по уровню соответствующего лепестка, можно оценить количество объектов  $n$ , одновременно находящихся в пределах луча ДН. Это количество будет пропорциональным отношению объема, занимаемого ДН антенны (усеченный конус)  $V_{\text{ДН}}$  к объему сферической оболочки Земли  $V_{\text{со}}$ , в которой располагаются орбиты объектов космического мусора:

$$n = NV_{\text{ДН}}/V_{\text{со}}, \quad (9)$$

где 
$$V_{\text{ДН}} = \frac{\pi}{3} \operatorname{tg}^2 \theta (h_{\text{макс}}^3 - h_{\text{мин}}^3), \quad V_{\text{со}} = \frac{4}{3} \pi [(R_3 + h_{\text{макс}})^2 - (R_3 + h_{\text{мин}})^2].$$

Поскольку мы рассматриваем объекты космического мусора на низких околоземных орбитах, примем  $h_{\text{мин}} = 100$  км,  $h_{\text{макс}} = 2000$  км.

При малых значениях  $n$  более наглядной характеристикой является периодичность появления объектов космического мусора в ДН антенны  $t_n$ .

Можно показать, что

$$t_n = \frac{T}{n} \cdot \frac{\alpha}{360}, \quad (10)$$

где  $T$  и  $\alpha$  определяются из (6), (7),  $n$  – из (9). При  $h = h_{\max}$  получим  $t_n = t_{n \max}$ .

**Результаты расчетов.** Для объектов с поперечными размерами 1 мм, 1 см, 10 см и 30 см определим из (4) соответствующую им эффективную отражающую площадь  $S_{\text{отр}}$ . Подставив значения  $P_{\text{пер}}$ ,  $S_{\text{отр}}$ , а также усиления  $G_a$  и эффективной площади  $A_{\text{эфф}}$  главного и боковых лепестков ДН НДА-100 в (1) и вычислив мощность шума из (2), получим зависимости отношения мощности отражений к мощности шума (далее – отношение отражение/шум)  $q = P_{\text{отр}}/P_{\text{ш}}$  от расстояния до объекта  $r$ . Полученные зависимости представлены на рис. 5 – 8.

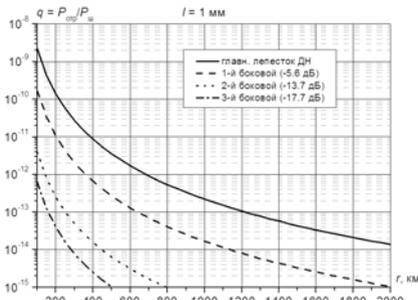


Рис. 5 – Зависимость отношения отражение/шум от расстояния до объекта с  $l = 1$  мм

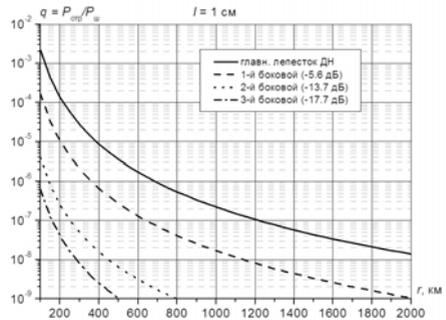


Рис. 6 – Зависимость отношения отражение/шум от расстояния до объекта с  $l = 1$  см

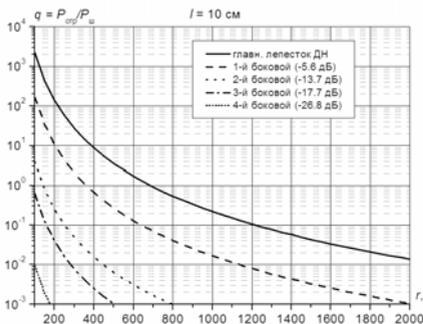


Рис. 7 – Зависимость отношения отражение/шум от расстояния до объекта с  $l = 10$  см

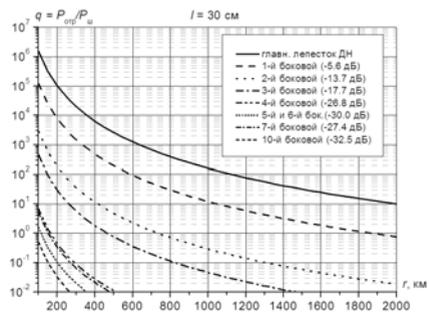


Рис. 8 – Зависимость отношения отражение/шум от расстояния до объекта с  $l = 30$  см

Из представленных зависимостей следует, что мощность отражений от космического мусора с поперечными размерами 1 см и менее не превышает мощности шума системы. Объекты космического мусора с поперечником 10 см создают помехи по главному лепестку ДН антенны НДА-100 на высотах до 700 км. Объекты с размерами 30 см и более создают мощные отражения по главному лепестку на высотах до 2000 км и более, а также по 1-му, 2-му и 3-му боковым лепесткам на высотах до 1900, 750 и 450 км соответственно. По 4 – 7 боковым лепесткам возникновение отражений возможно только на очень низких высотах – до 150 км.

Время пролета объектов через ДН по уровню главного и первых семи боковых лепестков представлено в виде графиков на рис. 9.

Из приведенных зависимостей следует, что для объекта, пересекающего ДН антенны через её центр (по диаметру горизонтального сечения), время пролета главного лепестка составляет от 0,45 до 10 с в зависимости от высоты орбиты объекта. Для уровня 7-го бокового лепестка это время увеличивается до 6 – 140 с.

Поскольку орбиты объектов пересекают ДН не только по диаметру горизонтального сечения, но и по хордам, то приведенные на рис. 9 времена пролета следует рассматривать как максимальные.

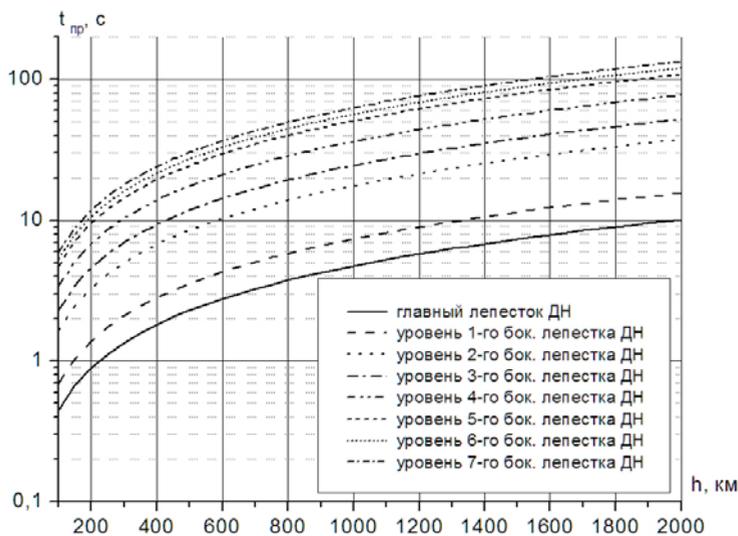


Рис. 9 – Время пролета объектов через ДН антенны НДА-100

Количество объектов космического мусора, одновременно присутствующих в луче ДН антенны НДА-100 и периодичность их появления определены из (9), (10) и приведены в таблице.

Таблица – Количество объектов космического мусора в луче ДН антенны НДА-100

Размер объекта в поперечнике	0.1 – 1 см	1 – 10 см	>10 см
Количество на низкой околоземной орбите	$2 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^4$
Количество в главном лепестке ДН	38	0.77 (1 объект не реже, чем через 13 с)	0.029 (1 объект не реже, чем через 349 с)
Количество в ДН по уровню 1-го бокового лепестка	– ( $q \ll 1$ )	1.85	0.07 (1 объект не реже, чем через 224 с)
Количество в ДН по уровню 2-го бокового лепестка	– ( $q \ll 1$ )	11	0.4 (1 объект не реже, чем через 94 с)
Количество в ДН по уровню 3-го бокового лепестка	– ( $q \ll 1$ )	21	0.77 (1 объект не реже, чем через 68 с)

**Выводы.** Произведенные вычисления показали количество объектов космического мусора, присутствующих в луче ДН антенны НДА-100. В формировании помех от космического мусора, в основном, участвуют главный и 1 – 3 боковые лепестки ДН антенны. В радаре НР с антенной НДА-100 образование помех происходит от объектов космического мусора с поперечными размерами 1 см и более. Для устранения влияния отражений от космического мусора на результаты ионосферных измерений необходимо использование специального программного обеспечения, которое позволит отфильтровать сильные отражения.

**Список литературы:** 1. *Chen Shenyan*. Orbital Debris Characteristic Analysis and A Small Debris Collection Concept // Presentation at 2010 Beijing Orbital Debris Mitigation Workshop. Oct 18 – 19, 2010, Beijing, China – (<http://swfound.org/media/28341/Shenyan-SmallDebrisCollection.pdf>). 2. *Johnson N*. USA Space Debris Environment, Operations and Policy Updates // Presentation to the 49th Session of the Scientific and Technical Subcommittee Committee on the Peaceful Uses of Outer Space United Nations. 6 – 7 February 2012 – (<http://www.unoosa.org/pdf/pres/stsc2012/tech-26E.pdf>). 3. *NASA*. USA Space Debris Environment, Operations, and Policy Updates // Presentation to the 48th Session of the Scientific and Technical Subcommittee Committee on the Peaceful Uses of Outer Space United Nations 7 – 18 February 2011 – (<http://www.oosa.unvienna.org/pdf/pres/stsc2011/tech-31.pdf>). 4. *Смирнов Н.Н.* Эволюция «космического мусора» в околоземном космическом пространстве // Успехи механики. – 2002. – № 2. – С. 37-104. 5. Радиолокационные устройства (теория и практика применения). / Под ред. В.В. Григорина-Рябова. – М.: Сов. радио, 1970. – 680 с. 6. *Шубарин Ю.В.* Антенны сверхвысоких частот. – Х.: ХГУ, 1960. – 284 с. 7. Теоретические

основы радиолокации. / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1964. – 732 с. 8. Инженерный справочник по космической технике. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. А.В. Соловьева. – М.: Воениздат, 1977. – 430 с.

*Поступила в редколлегию 19.11.2013*

УДК 550.388.1; 629.78

**Оценка уровня помех от космического мусора при измерении ионосферных параметров на радаре НР с антенной НДА-100 / Я.Н. Чепурный, А.И. Лялюк // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 38-45. Бібліогр.: 8 назв.**

У статті проведена оцінка рівня і часу впливу перешкод, зумовлених відбиттям від космічного сміття при проведенні іоносферних вимірювань на радарі НР з антенною НДА-100.

**Ключові слова:** радар некогерентного розсіяння, вимірювання іоносферних параметрів, космічне сміття, рівень перешкод.

This paper describes the evaluation of the level and timing of interference caused by reflections from debris during ionospheric measurements on IS radar with antenna NDA -100.

**Keywords:** incoherent scatter radar, measuring ionospheric parameters, space debris, level of interference.