

## ОСНОВЫ МЕТОДИК НАЗЕМНЫХ ПРОВЕРОК РАЗРЕШЕНИЯ РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗОМ АПЕРТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

М.Н. Наумович, С.Р. Гейстер, С.П. Урбанович, Г.Н. Демидович,  
В.Т. Ревин, А.П. Юбко  
Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники, Минск

*Представлены результаты разработки методик полунатурных и лабораторных проверок разрешающей способности вдоль линии перемещения радиолокатора с синтезом апертуры космического базирования. Особенностью наземной проверки радиолокатора является учет условий его функционирования в штатном режиме на орбите космического аппарата. Для проверки разрешения этого радиолокатора предложено в наземных испытаниях использовать условие эквивалентности и обращенный синтез апертуры антенны. Условие эквивалентности предполагает выбор дальности и скорости перемещения контрольных отражателей или источника испытательного сигнала относительно радиолокатора, которые находятся в пропорции с рабочими значениями дальности и скорости при перемещении носителя радиолокатора на орбите.*

### Введение

При создании радиолокатора с синтезом апертуры (РСА), который должен функционировать на низкоорбитальном космическом аппарате (КА), необходимо проводить проверку качества функционирования и отладку устройства синтеза апертуры антенны (САА). Основными показателями качества функционирования РСА являются требуемые разрешающие способности на плоскости наблюдения:  $\Delta l_{КА}$  – по оси вдоль линии полета КА и  $\Delta d$  – по оси, перпендикулярной линии полета. Значение  $\Delta l_{КА}$  определяется совокупностью параметров САА, а значение  $\Delta d$  – шириной спектра зондирующего сигнала (ЗС). Значение  $\Delta d$  проверяется путем измерения ширины спектра отраженного ЗС от точечного отражателя и длительности его свертки на выходе устройства внутрипериодной обработки сигнала. Проверка значения  $\Delta l_{КА}$  в наземных условиях требует отдельного рассмотрения. Она может проводиться при разработке и отладке РСА, в процессе проведения полунатурных испытаний, а также в лабораторных условиях.

### 1. Условие эквивалентности для полунатурных и лабораторных проверок

Разрешающая способность РСА по азимуту при прямоугольном амплитудном распределении ЭМП по раскрыву антенной решетки определяется выражением

$$\Delta\beta_{САА} = \frac{\lambda}{2V_N T_{САА}}, \text{ рад}, \quad (1)$$

где  $V_N$  – скорость полета КА;  $T_{САА}$  – время САА;  $\lambda$  – длина волны излучения РСА.

Линейная разрешающая способность РСА  $\Delta l_{КА}$  на дальности  $r_{СА}$  вдоль линии полета в режимах бокового обзора с учетом (1) описывается выражением

$$\Delta l_{КА} \cong 2r_{СА} \sin \frac{\Delta\beta_{САА}}{2} \cong r_{СА} \Delta\beta_{САА} \cong r_{СА} \frac{\lambda}{2V_N T_{САА}}, \text{ м}. \quad (2)$$

Для требуемой по ТЗ величины  $\Delta l_{KA} = \Delta l_{tr}$  из (2) можно определить требуемое время САА  $T_{SAA_{tr}}$  при заданной дальности  $r_{SA}$  и скорости полета носителя  $V_N$ :

$$T_{SAA_{tr}} \cong r_{SA} \frac{\lambda}{2V_N \Delta l_{tr}}, c. \quad (3)$$

Для проверки разрешающей способности  $\Delta l_{KA} = \Delta l_{tr}$  в наземных условиях используется обращенный САА [1]. При этом РСА неподвижен, а разрешаемые объекты движутся со скоростью, существенно меньшей скорости КА. Суть проверки заключается в определении обеспечиваемой РСА разрешающей способности  $\Delta l_{KA}$  по линейно перемещаемым «точечным» отражателям для заданного  $T_{SAA_{tr}}$  при выполнении условия эквивалентности. Рассмотрим обоснование этого условия [2].

Разрешающая способность  $\Delta l_{KA}$  РСА, установленного на КА, вдоль линии перемещения на дальности  $r_{SA_{KA}}$  с учетом (2) описывается выражением

$$\Delta l_{KA} \cong 2r_{SA_{KA}} \frac{\lambda}{2V_{N_{KA}} T_{SAA_{KA}}}, m, \quad (4)$$

где  $r_{SA_{KA}}$  – расстояние от РСА на КА до элемента разрешения на поверхности Земли. Скорость перемещения КА  $V_{N_{KA}} = 7595 m/c$ . Время САА в РСА на борту КА, при котором на дальности  $r_{SA_{KA}}$  будет обеспечено равенство  $\Delta l_{KA} = \Delta l_{tr}$ ,  $T_{SAA_{KA}} = T_{SAA_{tr}}$ .

Линейная разрешающая способность  $\Delta l_{Gr}$  РСА, расположенного на Земле для проверок и работающего в режиме обращенного САА на дальности  $r_{SA_{Gr}}$ , с учетом (2) описывается выражением

$$\Delta l_{Gr} \cong 2r_{SA_{Gr}} \frac{\lambda}{2V_{N_{Gr}} T_{SAA_{Gr}}}, m, \quad (5)$$

где  $r_{SA_{Gr}}$  – радиальное расстояние от РСА до перемещающихся объектов разрешения (отражателей). Скорость перемещения отражателей –  $V_{N_{Gr}}$ . Время САА, при котором на дальности  $r_{SA_{Gr}}$  будет обеспечено разрешение  $\Delta l_{Gr}$ , равно  $T_{SAA_{Gr}}$ .

Критерием эквивалентности является требование равенства времени САА  $T_{SAA_{Gr}} = T_{SAA_{KA}}$ . Следовательно, можно записать выражение

$$\frac{T_{SAA_{Gr}}}{T_{SAA_{KA}}} = \frac{2r_{SA_{Gr}} \frac{\lambda}{2V_{N_{Gr}} \Delta l_{Gr}}}{2r_{SA_{KA}} \frac{\lambda}{2V_{N_{KA}} \Delta l_{KA}}} = \frac{r_{SA_{Gr}} V_{N_{KA}} \Delta l_{KA}}{r_{SA_{KA}} V_{N_{Gr}} \Delta l_{Gr}} = 1. \quad (6)$$

В таком случае отношение  $\Delta l_{Gr} / \Delta l_{KA}$  при  $T_{SAA_{Gr}} = T_{SAA_{KA}} = T_{SAA_{tr}}$  имеет вид

$$\frac{\Delta l_{Gr}}{\Delta l_{KA}} = \frac{r_{SA_{Gr}} V_{N_{KA}}}{r_{SA_{KA}} V_{N_{Gr}}}. \quad (7)$$

Из равенства (7) получим соотношение эквивалентности оценок разрешающей способности РСА в условиях космического полета и испытаний на Земле в режиме об-  
 ращенного САА в виде  $\Delta l_{Gr} = \Delta l_{KA} \frac{r_{SA\_Gr} V_{N\_KA}}{r_{SA\_KA} V_{N\_Gr}}$ .

Следовательно, если установленный на Земле РСА обеспечивает разрешение  $\Delta l_{Gr}$  «точечных» отражателей, движущихся на дальности  $r_{SA\_Gr}$  со скоростью  $V_{N\_Gr}$ , а время САА  $T_{SAA\_Gr} = T_{SAA\_KA} = T_{SAA\_tr}$ , то в условиях космического полета РСА, который дви-  
 жется со скоростью  $V_{N\_KA}$  на дальности  $r_{SA\_KA}$ , будет обеспечено разрешение  $\Delta l_{KA} = \Delta l_{tr}$ .

Рассмотрим пример. Пусть при движении КА со скоростью  $V_{N\_KA} = 7595 \text{ м/с}$  на  
 дальности  $r_{SA\_KA} = 556698 \text{ м}$  обеспечивается  $\Delta l_{KA} = \Delta l_{tr} = 1 \text{ м}$ , а время САА  
 $T_{SAA\_KA} = 1,136 \text{ с}$ . В проверках РСА на Земле при  $T_{SAA\_Gr} = T_{SAA\_KA} = 1,136 \text{ с}$  два точечных  
 отражателя, которые движутся со скоростью  $V_{N\_Gr} = 11,111 \text{ м/с}$  (40 км/ч) на дально-  
 сти  $r_{SA\_Gr} = 6000 \text{ м}$ , должны разрешаться при  $\Delta l_{Gr} = \Delta l_{KA} \frac{r_{SA\_Gr} V_{N\_KA}}{r_{SA\_KA} V_{N\_Gr}} = 7,367 \text{ м}$ . При  
 скорости движения отражателей  $V_{N\_Gr} = 27,777 \text{ м/с}$  (100 км/ч)  $\Delta l_{Gr} = 2,947 \text{ м}$ .

## 2. Особенности организации полунатурных и лабораторных проверок

В ходе полунатурных проверок объекты разрешения – отражатели перемещаются  
 по прямой линии, перпендикулярной линии визирования РСА. Дальность  $r_{SA\_Gr}$  должна  
 превышать протяженность «мертвой зоны» РСА, зависящей от длительности зондиру-  
 ющего импульса и времени восстановления приемника. Пояснения представлены  
 на рис. 1.

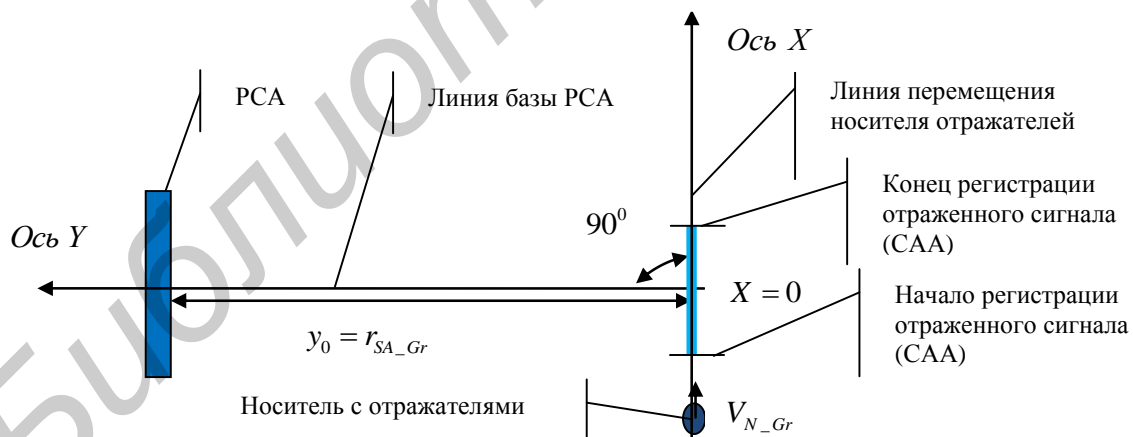


Рис. 1. Пояснения к организации проверок РСА

В ходе проверок РСА зондирует отражатели, установленные на подвижном носи-  
 теле. Синтез апертуры антенны выполняется для каждого канала дальности на интерва-  
 лах САА  $T_{SAA\_Gr}$ . В результате для каждого  $i$ -го канала дальности будет сформировано  
 $N_{L\_SAA}$  отсчетов сигналов с выхода устройства САА  $U_{Вых\ САА}(n, i)$ ,  $n = \overline{1, N_{L\_SAA}}$ .

На рис. 2 представлены квадраты модулей  $|U_{\text{ВыхСАА}}(n, i)|^2$ ,  $n = \overline{1, N_{L\_САА}}$ , полученные на выходе устройства САА при наблюдении одного точечного отражателя, движущегося в соответствии с рис. 1. Ось  $n$  соответствует оси  $X$  рис. 1, а расстановка элементов каналов САА по оси  $n$  соответствует интервалу  $\delta X$ . Интервал  $\Delta L_R = \delta X (n_{0,5\_2} - n_{0,5\_1})$  соответствует реальной линейной разрешающей способности РСА по азимуту.

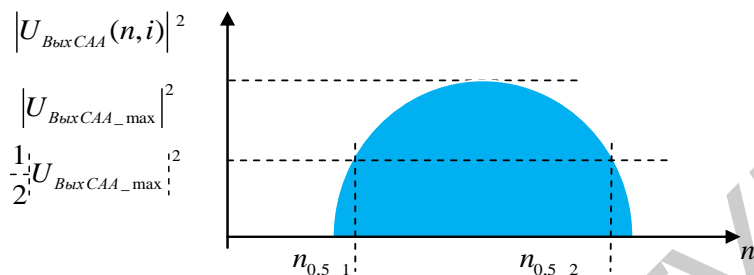


Рис. 2. Пояснения к определению реального разрешения  $\Delta L_R$

При проведении лабораторных проверок может быть использован имитируемый физически отраженный сигнал, когерентный зондирующему сигналу РСА, с теми же параметрами модуляции. При этом РСА работает в режиме обращенного САА. Излучатель имитируемого сигнала, например рупорный, должен перемещаться в дальней зоне Френеля относительно РСА аналогично перемещению точечных отражателей при полунатурных проверках (см. рис. 1). Скорость перемещения источника имитируемого сигнала и время САА определяются из выражений (5) и (6) с учетом пространственного расположения РСА и движущегося источника имитируемого сигнала в условиях лабораторных проверок. Сигналы излучателя принимаются РСА, претерпевают внутрипериодную обработку, накапливаются и обрабатываются в каналах подсистемы САА.

Основной проблемой при выполнении лабораторных проверок является максимальное подавление проходящих к антенне РСА волн, отраженных от посторонних предметов, для чего необходимо использовать поглощающие материалы.

## Заключение

Лабораторные и полунатурные проверки РСА космического базирования в наземных условиях имеют большое значение в обеспечении гарантий качества и сокращении затрат на проектирование РСА. В основе разработанных методик лабораторных и полунатурных проверок РСА лежит критерий эквивалентности. На его основе количественно определяются требования к условиям проведения проверок.

## Список литературы

1. Пархоменко, Н.Г. Экспериментальные исследования радиолокационных портретов автомобилей при обращенном синтезе апертуры антенны с полной фокусировкой / Н.Г. Пархоменко, А.С. Гейстер // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2011. — № 1. — С. 27–31.
2. Методика проверки в наземных условиях линейного разрешения по азимуту радиолокатора с синтезом апертуры космического базирования / С.Р. Гейстер [и др.] // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. — 2016. — № 6. — С. 24–29.