

Балиж<sup>1</sup> К.С., Костров<sup>2</sup> В.В.<sup>1</sup>АО «Научно-исследовательский институт «Субмикрон»  
124498, г.Москва, Зеленоград, Георгиевский проспект, д. 5, стр. 2<sup>2</sup>Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного  
учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: vvk\_2004@rambler.ru**Оценка величины доплеровского сдвига при неточности позиционирования луча антенны РСА космического базирования**

Одним из наиболее эффективных инструментов дистанционного зондирования Земли из космоса являются радиолокаторы с синтезированием апертуры антенны (РСА), которые обеспечивают выполнение целевых задач независимо от времени суток и погоды [1,2]. В отличие от радиолокаторов бокового обзора РСА существенно используют доплеровское смещение частоты, возникающее в отраженном от земной поверхности сигнале за счет движения носителя [1–3]. Стремление получить высокое пространственное разрешение приводит к увеличению времени синтезирования апертуры и, как следствие, к расширению спектра доплеровских частот траекторного сигнала [3,4]. Кроме этого, естественного для РСА доплеровского смещения в частоте сигнала возникают изменения за счет дополнительных факторов, в ряде случаев носящих случайный характер [4].

Целью доклада является оценка влияния неточности установки луча антенной системы РСА X-диапазона на доплеровское смещение частоты.

Вопрос о требованиях по обеспечению точности установки луча антенной системы РСА имеет системный характер, затрагивают весь космический комплекс, включая управление КА и режимы съемки бортового радиолокационного комплекса (БРЛК), формирование полетного задания на борту и обработку радиоголограмм в наземном центре.

Пределы и закон изменения доплеровского смещения частоты являются основополагающими при проектировании, как режима съемки, так и алгоритмов системы обработки сигналов. Далее будем ориентироваться на наиболее востребованный режим работы – маршрутный, при котором диапазон изменения частоты Доплера определяется шириной физической диаграммы направленности антенны.

Предположим, что в плоскости траверза антенна для опорной точки выведена на нулевой доплеровский сдвиг. Тогда в азимутальной плоскости максимальное доплеровское смещение частоты определяется соотношением

$$F_{d\max} = \pm \frac{2V_{КА}}{\lambda} \sin(0,5 \cdot \theta_{0,5a}),$$

где  $\theta_{0,5a}$  – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) в азимутальной плоскости,  $V_{КА}$  – скорость космического аппарата (КА),  $\lambda$  – длина волны. Ширина спектра траекторного сигнала  $\Delta F_{ts} = 2 |F_{d\max}|$  соответствует в первом приближении девиации частоты ЛЧМ сигнала (это относится к маршрутному и сканирующему режимам, когда используется квадратичная аппроксимация изменения расстояния).

Оценим приближенно ширину спектра для примера с учетом следующих данных: ширина диаграммы направленности  $\theta_{0,5a} = 0,5^\circ$ , скорость КА 7600 м/с, длина волны 0,0314 м. Получаем

$$\Delta F_{ts} = 2 \cdot \frac{2 \cdot 7600}{0,0314} \sin(0,5 \cdot 0,5^\circ) = 4224 \text{ Гц.}$$

Для получения уровня неоднозначности по азимуту порядка минус 20 дБ и неискаженного воспроизведения ЛЧМ сигнала (соответственно, для качественного сжатия по азимуту и синтеза РЛИ) необходимо иметь частоту повторения импульсов  $F_p = 1,14 \Delta F_{ts}$  без учета погрешностей установки луча. Практически нужно иметь запас по начальному доплеровскому смещению частоты (20...40 %)  $\Delta F_{ts}$  (в сканирующем режиме более 50%). В рассматриваемом примере это составляет порядка 850...1700 Гц в зависимости от частоты повторения. В противном случае будет наложение спектров, которое разрешить сложнее.

Одной из отличительных особенностей РСА космического базирования от аналогичных систем авиационного базирования заключается в том, что в процессе дистанционного зондирования Земли на доплеровское смещение частоты существенно влияет собственное

движение Земли. Это обусловлено в первую очередь высокими скоростями движения носителя (космического аппарата – КА) и вращения Земли вокруг своей оси. Ясно, что сложное взаимное движение РСА и объекта съемки приводит к влиянию на доплеровское смещение траекторного сигнала таких факторов как скорость вращения Земли в точке съемки, вид и параметры орбиты движения КА, ориентация КА в выбранной системе координат (крен, курс, тангаж), ориентация диаграммы направленности, восходящая или нисходящая ветви витка; местность, над которой пролетает КА (вызывает изменение высоты орбиты, появляется вертикальная составляющая скорости и дополнительное доплеровское смещение). Например, угловые отклонения осей КА также приводят к дополнительным радиальным компонентам скорости и дополнительному среднему доплеровскому смещению.

Перед радиолокационной съемкой проводятся соответствующие расчеты, и формируется полетное задание. Это делается с использованием специального программного обеспечения (ПО), как в наземном комплексе (общие параметры задания на съемку), так и в бортовом вычислительном комплексе (детальный расчет настроечных параметров). На основании общих параметров задания на съемку в бортовом вычислительном комплексе проводится расчёт параметров и времён выдачи команд управления системами КА и наведения луча антенной системы, установка длительности импульсов, периода следования, девиации и т.п. параметров БРЛК для каждого участка съёмки и режима съёмки. При расчёте используются геодезические координаты заданной опорной точки сцены, данные о возвышении этой точки относительно эллипсоида Красовского, координаты КА и др. баллистические параметры траектории. При необходимости производится коррекция пространственного положения КА таким образом, чтобы в момент достижения траверсного положения КА относительно опорной точки выполнялось условие нулевого доплеровского сдвига. Это достигается поворотом КА по курсу, тогда при произвольной широте объекта съемки можно скомпенсировать радиальную составляющую скорости Земли. Расчеты должны обеспечивать установку луча по отношению к объекту съемки с точностью 200...600 м (примерно до 5% от размера сцены). Это соответствует суммарной погрешности установки луча порядка 1...3 угловых минут, а с точки зрения доплеровской частоты необходим дополнительный запас на 140...420 Гц.

В современных РСА используются активные фазированные антенные решетки, в которых управление лучом осуществляется с помощью дискретных фазовращателей и аттенуаторов с цифровым управлением. Дискретизация управления, в конечном счете, приводит к погрешности в установке луча диаграммы направленности  $\Delta\theta$ , которая определяется конструкторскими параметрами и разрядностью управляющих элементов. Для снижения неравномерности радиометрических искажений требования к точности позиционирования диаграммы направленности антенны предъявляются порядка  $\frac{1}{16}\theta_{0,5}$ , что дает в пересчете к доплеровскому смещению частоты необходимость введения дополнительного запаса величиной 265 Гц. В вертикальной плоскости могут допускаться более существенные ошибки в расчете крена КА. В основном такие погрешности установки луча антенны приводят к росту радиометрической неравномерности РЛИ по кадру.

Решение задачи снижения и компенсации дополнительного доплеровского смещения частоты, возникающего из-за неточности установки луча антенной системы, может быть частично осуществлено при формировании и наземной обработке радиолокационных изображений (РЛИ). Для этого используется одна из вспомогательных программ обработки изображений, предназначенная для измерения средней доплеровской частоты по синтезируемому кадру. За счет того, что количество отсчетов велико и составляет в кадре несколько миллионов, точность измерения высока (десятые доли Гц). Измеренная частота вводится как поправка в алгоритм синтеза и, тем самым, обеспечивает качественный синтез РЛИ. Однако следует учитывать, что эффекты азимутальной неоднозначности с помощью этого приема не удаляются.

#### Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника. 2010.
2. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.
3. Воздушная разведка. Автоматизированное дешифрирование радиолокационных изображений. Монография / Под ред. И.К. Антонова. – М: Радиотехника, 2021.
4. Костров В.В., Толстов Е.Ф. Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн / VII Всероссийские Армандовские чтения: молод. школа. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2017. – С.76-113.