

Анализ особенностей доплеровского сдвига частоты при переднебоковом обзоре в РСА

М.И. Бабокин, О.Е. Цветков

ГУП НПП «Спурт», Москва, Зеленоград, 4-й западный проезд, д.8, E-mail: titovmp@mail.ru

В статье рассматриваются закономерности изменения траекторного сигнала РЛС с синтезированием апертуры антенны при переднебоковом обзоре. Обычно фазовые закономерности сигнала связывают с изменением наклонной дальности, рассматривают диапазон ее изменения с точки зрения качества фокусировки (глубина резкости). Оказывается, не менее чувствительным может быть и доплеровский сдвиг отклика точечной цели при определенной «геометрии обзора». Появляется возможность построения стереометрических режимов измерения высот.

Regularities of SAR trajectory signals for the forward-side looking mode are considered – in the paper. Signal phase behaviour peculiarities are usually treated as being dependent on slant range variations, variation span being considered in terms of focusing quality (depth of field). There are some survey geometry modes found to result in its being sensible to point target response Doppler shift. This effect enables stereometric altitude measurement modes.

Одним из видов обзора земной поверхности в современных РЛС с синтезированием апертуры антенны (РСА) является переднебоковой. В этом способе обзора при выбранном начальном угле установки α антенна РЛС стабилизируется по азимутальному углу $\alpha = \text{const}$, а зона захвата формируется вдоль некоторой линии (см. рис. 1). Линейная скорость перемещения ДНА по поверхности земли равна путевой скорости носителя:

Процесс формирования траекторного сигнала в этом случае сопровождается эффектом миграции сигнала по каналам дальности (при высоком пространственном разрешении). Кроме того, азимутальный сигнал каждого отражателя на поверхности имеет, как оказывается, разный доплеровский сдвиг.

Для переднебокового (ПБО) обзора, определяемого азимутальным углом наблюдения β и углом визирования γ_0 на поверхности XOY (см. рис. 1, H – высота полета носителя), закон изменения наклонной дальности в случае ПБО аппроксимируется соотношением [1]:

$$r(t) \approx r_0 + V_r \cdot t + a_r t^2 / 2, \quad (1)$$

где r_0 – наклонная дальность в центре интервала синтезирования, а радиальные скорость и ускорения зависят от углов наблюдения и визирования:

$$\begin{aligned} V_r &= -V \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma_0, \\ a_r &= V^2 \cdot (1 - \cos^2 \beta \cdot \cos^2 \gamma_0) / r_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь V – путевая скорость носителя.

Траекторный сигнал полностью определяется текущим расстоянием точечная цель – носитель РСА: $\dot{s}(t) = \exp\{-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t)\}$, $|t| \leq T/2$, T – временной интервал синтезирования апертуры, λ – длина волны излучения.

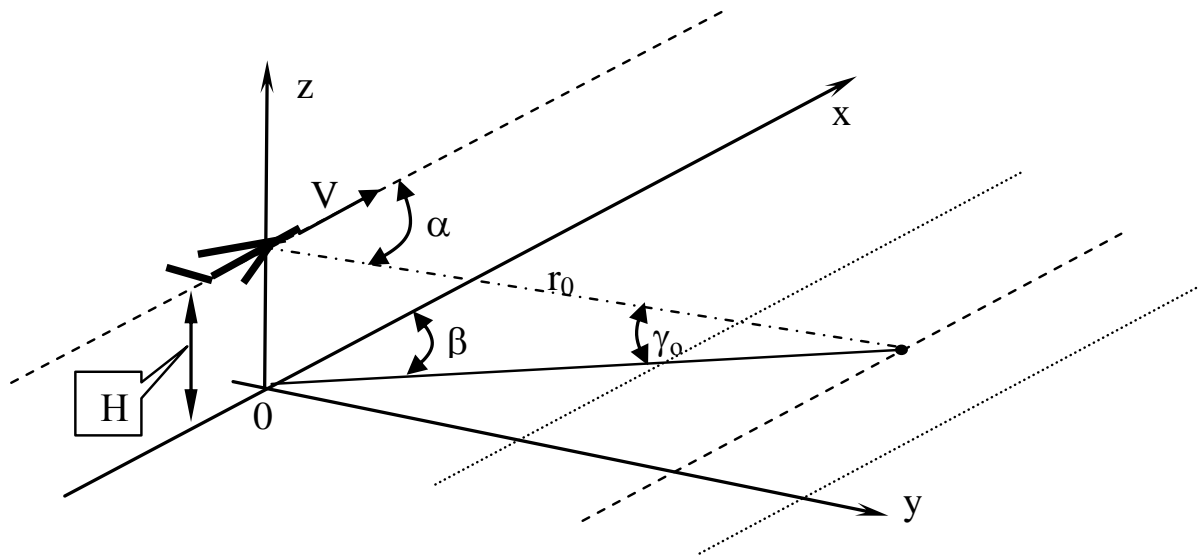


Рис. 1. Геометрия ПБО

Как следует из (1), (2), в выражении функции дальности присутствует кроме квадратичного еще и линейный член, который приведет при высоком разрешении и соответствующей «геометрии» обзора к линейной миграции сигнала. Линейный «наклон» сигнала точечного отражателя можно, для не слишком протяженных голограмм по путевой координате x компенсировать простым смещением зондирований по закону $V_r \cdot t$ (по дальности r). Оставшийся квадратичный член компенсируется в алгоритме «дальность-доплер» простым «выпрямлением» в частотной области по закону [3]

$$r(f_x) = \frac{f_x^2 \lambda^2 r_0}{8V^2},$$

где f_x – азимутальная частота сигнала. Причем для достаточно широких кадров по наклонной дальности (по r) закон миграции можно считать одинаковым.

Для фазовой структуры сигналов ситуация не однозначна. При разных наклонных дальностях r_0 , даже для постоянного азимутального угла наблюдения β , меняется угол визирования γ , и, следовательно, угол радиального направления α : $\cos \alpha = \cos \beta \cdot \cos \gamma$ (см. рис. 2). Следовательно, даже при переднебоковом обзоре (ПБО), когда $\alpha = \text{const}$, для разных наклонных дальностей будет разный доплеровский сдвиг: $f_{\text{доп}} = 2 \cdot V \cdot \cos \alpha \lambda$.

Раскладывая приращения дальности через малые приращения угла можно получить формулу «глубины» доплеровского сдвига, когда азимутальный сдвиг из-за расстройки по дальности Δr (меняется и угол α) не превысит половины элемента разрешения:

$$\Delta r = \frac{1/T}{2} \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \gamma_0 \cdot H}{2 \cdot V \cdot \sin^3 \gamma_0 \cdot \cos \beta}. \quad (3)$$

Учитывая, что интервал синтезирования T определяет азимутальное разрешение ρ [2]: $\rho = \frac{\lambda \cdot r_0}{2 \cdot T \cdot V \cdot \sin \alpha}$, выражение (3) можем переписать в виде:

$$\Delta r = \frac{\rho \cdot \sin \alpha \cdot \cos \gamma_0}{2 \cdot \sin^2 \gamma_0 \cdot \cos \beta},$$

или через угол наклона луча антенны в вертикальной плоскости ε (см. рис. 2):

$$\Delta r = \frac{\rho}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}^2 \varepsilon. \quad (4)$$

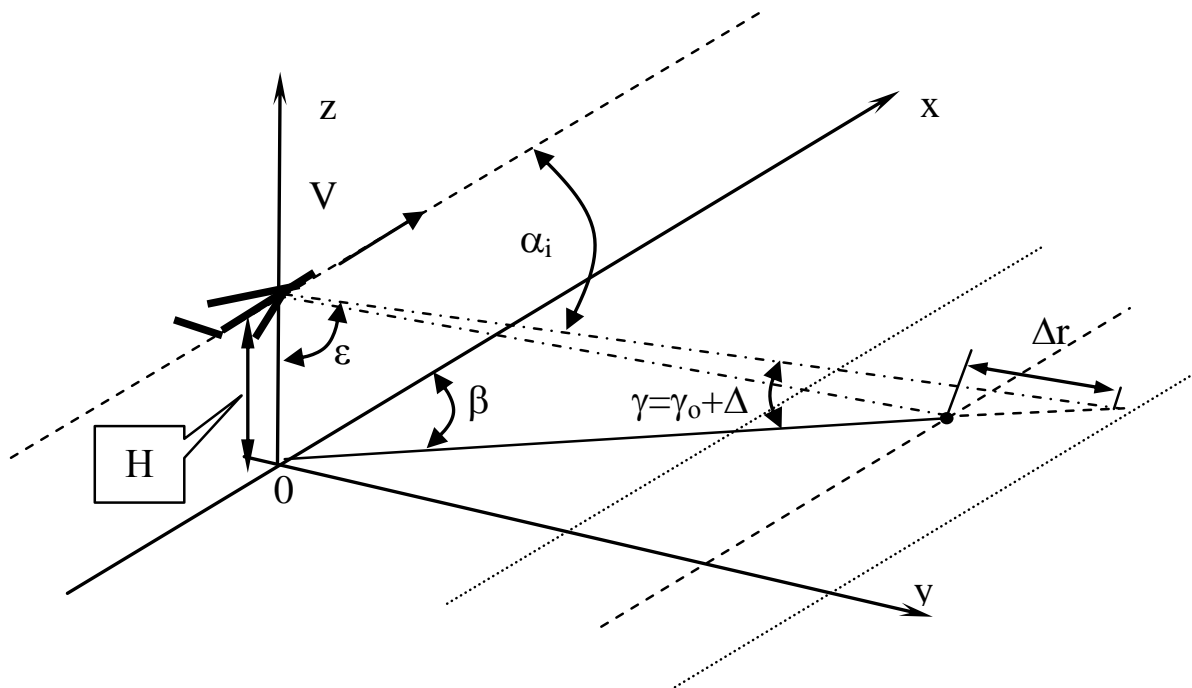


Рис. 2. Приращение дальности

Фактически Δr в (4) определяет диапазон дальностей, в котором можно использовать одну среднюю доплеровскую частоту: $f_{\text{доп}_i} = 2 \cdot V \cdot \cos \alpha_i / \lambda$. При этом не происходит масштабного искажения (сдвига изображения по азимуту). Оказывается, эта введенная величина «глубины» доплеровского сдвига Δr при ПБО может быть существенно меньше глубины резкости, определяемой расфокусировкой изображения

[2]: $\Delta R_x = 2 \cdot \frac{\rho^2}{\lambda}$ (ρ – азимутальное разрешение).

Например, для параметров обзора $\alpha = 35^\circ$, $\varepsilon = 60^\circ$ «глубина» доплеровского сдвига Δr составила бы 1,05 разрешения ρ . А глубина резкости ΔR_x обычно значительно больше пространственного разрешения (в десятки, сотни раз). Следовательно, в алгоритмах синтеза РЛИ нужно значительно чаще пересчитывать опорную функцию. На рис. 3 иллюстрируется график относительной «глубины» доплеровского сдвига $\Delta r / \rho$ в зависимости от угловых координат.

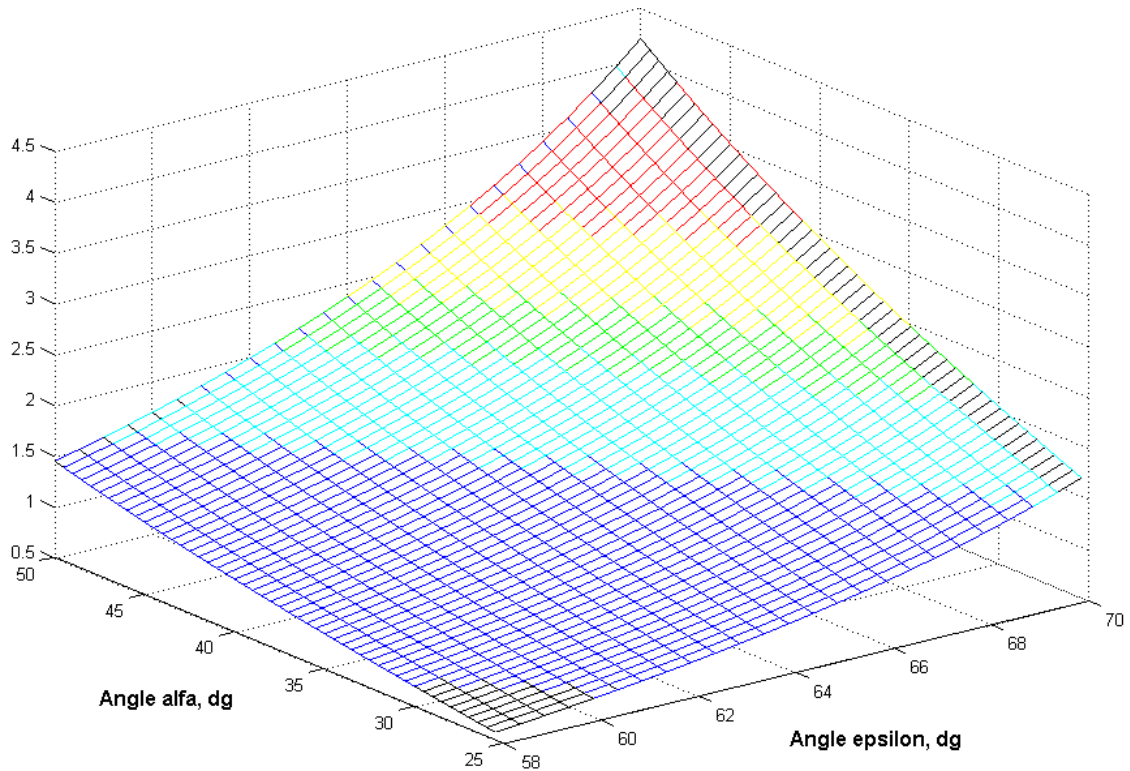


Рис. 3. Относительная «глубина» доплеровского сдвига

Анализ (4) показывает, что при «геометриях» обзора, в которых $\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}^2\varepsilon \rightarrow 2$, приращение наклонной дальности практически на элемент разрешения по дальности приведет к сдвигу по азимуту на величину, соизмеримую с разрешением ρ . Таким образом, рассматриваемая область углов (α, ε) очень чувствительна к изменению наклонной дальности (происходит сдвиг и по азимуту). Но изменение дальности до элемента при изменении ракурса наблюдения будет определяться так же и высотой над плоскостью XOY . Следовательно, существует практическая возможность построения доплеровского стереометра измерения высот с точностью, соизмеримой с разрешением.

Литература

1. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под редакцией Л.А. Школьного. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005.
3. Walter G. Carrara, Ron S. Goodman, Ronald M. Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar. Signal Processing Algorithms. – Boston, London: Artech House, 1995.