

Измерение доплеровского сдвига в РСА с миграцией сигнала

О.Е. Цветков, О.А.Карпов, М.П.Титов, Е.Ф.Толстов

ЗАО «АЭРОКОН», г. Жуковский, МО, ул. Гагарина, д.1, e-mail: al.vetckov@yandex.ru

В работе рассматриваются вопросы синтеза детальных радиолокационных изображений (РЛИ) в РЛС с синтезированием апертуры антенны (РСА). Отмечается, что процесс когерентного накопления сигнала в РСА неизбежно сопровождается дестабилизирующими факторами, затрудняющими формирование изображений. Одним из проявлений этих воздействий на процесс регистрации и обработки (фокусировки) сигнала по азимуту является некомпенсированный отворот луча антенны относительно вектора путевой скорости, что приводит к появлению неизвестного доплеровского сдвига. Учет неизвестного угла отворота становится необходимым для получения детального изображения. В данной статье предлагается использовать новый инструмент при адаптивной обработке, основанный на учете миграции сигнала, для однозначного измерения центральной доплеровской частоты (или угла отворота антенны).

The paper deals with the synthesis of detailed radar images in a radar with synthetic aperture antenna (SAR). It is noted that the process of coherent signal accumulation in SAR is inevitably accompanied by destabilizing factors that impede the formation of images. One of the manifestations of these influences on the registration process and on signal processing (focusing) in azimuth is non-compensated antenna beam lapel relative to the ground speed vector, which leads to the unknown Doppler shift. The accounting of the unknown lapel angle becomes necessary to obtain detailed images. In this paper we propose to use a new tool in adaptive processing based on the migration signal for an unambiguous measurement of the Doppler central frequency (or angle of antenna turn).

Процесс когерентного накопления сигнала в радиолокационных станциях (РЛС) с синтезированием апертуры антенны (РСА) неизбежно сопровождается дестабилизирующими факторами, затрудняющими получение высокодетального радиолокационного изображения (РЛИ). С улучшением разрешающей способности влияние априорно неизвестных параметров радиолокационного наблюдения только усиливается. Основными искажающими факторами, конечно, являются траекторные нестабильности полета носителя. Одним из проявлений этих воздействий на процесс регистрации и обработки (фокусировки) сигнала по азимуту является некомпенсированный отворот луча антенны относительно вектора путевой скорости, что приводит к появлению неизвестного доплеровского сдвига. Этот эффект приводит к серьезным сложностям при формировании высокодетальных РЛИ. Учет неизвестного угла отворота становится необходимым не только для получения детального изображения. Он позволяет провести необходимую коррекцию угловой ориентации носителя РСА. В данной работе предлагается использовать новый инструмент при адаптивной обработке, основанный на учете миграции сигнала для однозначного измерения центральной доплеровской частоты (или угла отворота антенны). Рассматривается маршрутный (полосовой) режим обзора. Нужно отметить, что коррекция угловой ориентации носителя предполагает, в этом случае, использование только регистрируемого сигнала РЛС, а не бортовых датчиков системы.

Траекторный сигнал РСА $\dot{s}(t)$ однозначно определяется законом изменения расстояния $r(t)$ до точечного отражателя за интервал когерентного накопления сигнала (интервал синтезирования – ИС) [1, 3]:

$$\dot{s}(t) = G(t) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t)\right),$$

где λ – длина волны излучения;

$G(t)$ – функция, учитывающая амплитудную модуляцию диаграммой направленности антенны;

t – путевое (азимутальное) время, связанное с полетом носителя относительно поверхности с путевой скоростью V .

В классической теории РЛС с синтезированием апертуры антенны принята и практически опробована аналитическая форма представления закона изменения дальности до точечного отражателя за интервал синтезирования T_c :

$$r(t) = r_0 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots, \quad |t| \leq T_c/2.$$

Уточнение коэффициентов с учетом реальной геометрии обзора имеет вид (см. рис. 1):

$$r(t) = r_0 - Vt \sin \beta + \frac{V^2 t^2 \cos^2 \beta}{2r_0} + \frac{V^3 t^3 \cos \beta^2 \sin \beta}{2r_0^2} - \frac{V^4 t^4 \cos^4 \beta}{8r_0^3} + \dots$$

Здесь r_0 – дальность до точки в центре ИС, V – путевая скорость носителя, β – «азимутальный» угол наблюдения относительно нормали к вектору скорости, L_c – пространственный интервал синтезирования.

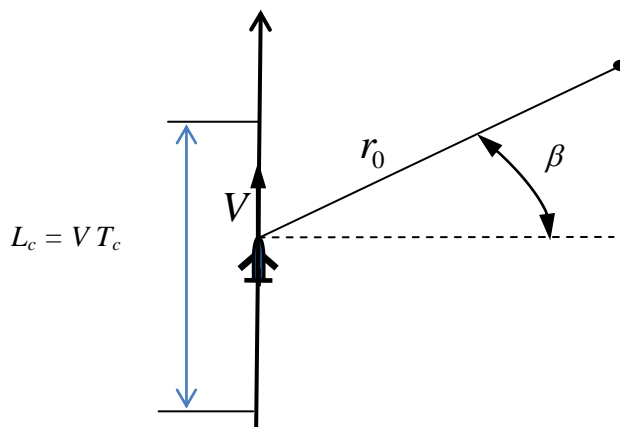


Рис. 1. Геометрия обзора («плоскость»)

Конечно, к настоящему времени разработаны достаточно эффективные подходы адаптивного измерения неизвестной центральной доплеровской частоты:

$$f_{d0} = \frac{2V \sin \beta}{\lambda} = \frac{2V_r}{\lambda} \quad (V_r - \text{радиальная скорость носителя}).$$

Это и измерение моментов среднего азимутального спектра, и алгоритмы оценки приращения фазы принятого сигнала между зондированиями [2]. Однако эти классические подходы позволяют

оценить значение частоты Доплера \hat{f}_{d0} в пределах зоны однозначности:

$$\hat{f}_{d0} \in [-F_p/2; +F_p/2], \quad \text{где } F_p - \text{частота повторения импульсов.}$$

С другой стороны, значение F_p определяет однозначный диапазон оценки азимутального угла. Принимая во внимание малые отклонения луча от траверза ($\sin \beta \approx \beta$) получаем диапазон однозначной оценки азимутального угла

$$\beta \in \left[-\frac{F_p \cdot \lambda}{4V}, +\frac{F_p \cdot \lambda}{4V} \right] \text{ рад.}$$

Учтем возможности современных РСА, которые имеют высокое пространственное разрешение, и используем связанные с этими характеристиками новые эффекты для однозначной оценки \hat{f}_{d0} .

Особенностью высокдетальных режимов является миграция сигнала по каналам дальности: за ИС изменение расстояния $r(t)$ превышает пространственный дискрет Δr по наклонной дальности:

$$r(t) - r_0 > \Delta r .$$

Величина дискрета Δr определяется в цифровой РСА тактовой частотой АЦП, т.е. согласована с разрешающей способностью по наклонной дальности. В РСА первых поколений значение Δr и протяженность интервала синтезирования были такими, что сигнал точечного отражателя полностью находился в одном канале дальности. При этом обеспечиваемое разрешение составляло величину от десятков до нескольких метров. Улучшение детальности РЛИ по наклонной и путевой дальностям приводит, во-первых, к уменьшению дискрета дальности Δr , во-вторых, к увеличению интервала синтезирования, вследствие чего происходит переход отсчетов сигнала из текущего канала дальности в соседние.

Примеры двумерных сигналов при миграции (квадратурные составляющие) представлены на рис. 2 в пространственных координатах: дальность \times азимут ($r \times x$).

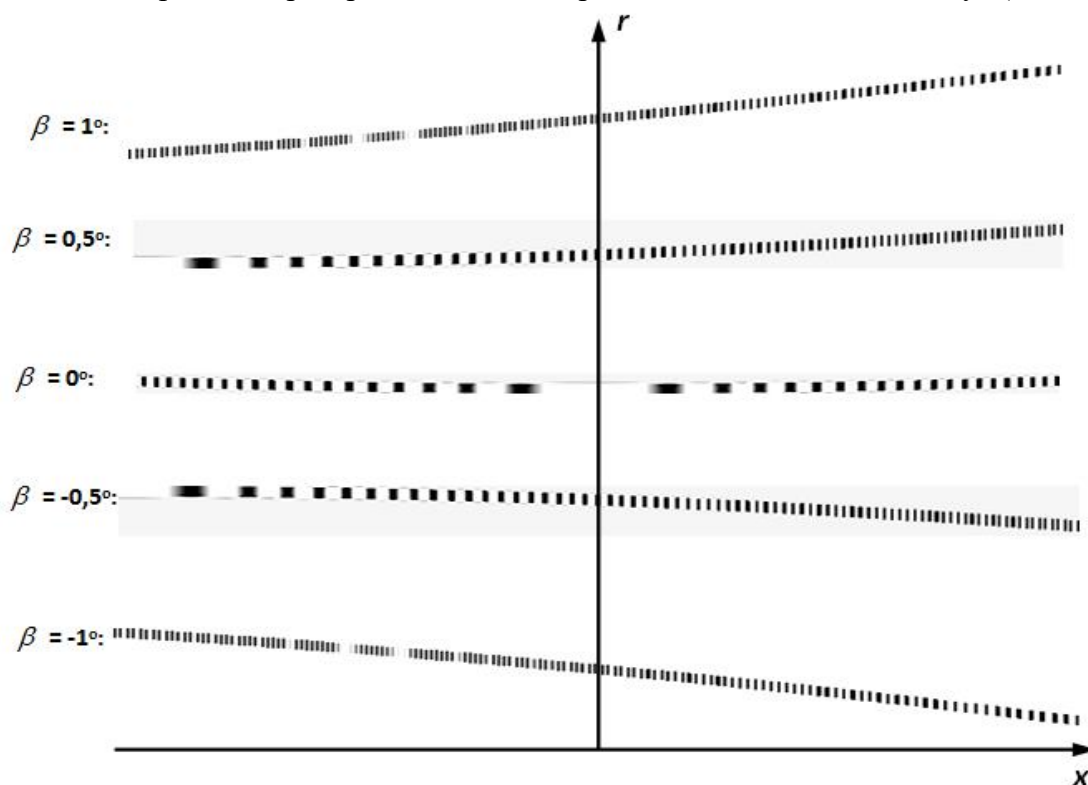


Рис. 2. Траекторные сигналы с миграцией при разных углах наблюдения

Особенностью сигнала с миграцией является своеобразное проявление шума дискретизации по азимуту. На рис.3 приведены фрагменты РЛИ, синтезированные при отсутствии (рис.3а) и при наличии (рис.3б) ошибок в угле отворота луча антенны. Сравнение РЛИ показывает, что неправильно оцененный доплеровский сдвиг приводит не просто к двоениям объектов на РЛИ, а к своеобразному шуму дискретизации – (представлено на рис. 3б и в [6]). Проявляются искажения в виде размазанных наплывов от ярких целей. На сюжете ошибочно присутствуют «облака».

Запишем двумерный сигнал точечного отражателя с учетом миграции по дальности [4]:

$$\dot{s}(r, x) = \dot{U}(r - r(x)) \cdot G(x) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r(x)\right), \quad (1)$$

где $\dot{U}(r)$ – комплексная огибающая излучаемого импульса.

Изменение положения функции $\dot{U}(r)$ по дальности обусловлено изменением расстояния в зависимости от азимутальной координаты x : $r - r(x)$. Функция $r(x)$ в простейшем случае имеет линейный и квадратичные члены:

$$r(x) = r_0 - x \sin \beta + \frac{x^2 \cos^2 \beta}{2r_0} + \dots \quad (2)$$



а) РЛИ без ошибки угла отворота антенны



б) РЛИ с ошибкой угла отворота в 1/3 ширины антенны

Рис. 3. Радиолокационные изображения РСА Кондор-Э

Формула (1) определяет ядро интегрального преобразования комплексной функции отражения поверхности $\dot{e}(r, x)$ в двумерный сигнал – голограмму: $\dot{\xi}(r, x) = \dot{e}(r, x) \otimes \dot{s}(-r, -x)$, где \otimes – символ операции двумерной свертки. Конечно, прием сигнала $\dot{\xi}(r, x)$ проводится на фоне шумов наблюдения.

Оценка функции отражения (комплексное РЛИ) по критерию максимума отношения сигнал-шум определяется двумерной сверткой с сопряженным ядром:

$$\hat{e}(r, x) = \hat{\xi}(r, x) \otimes \hat{s}^*(-r, -x).$$

С точки зрения цели данной работы функцию ядра (1) следует рассматривать как параметрическую, с априорно неизвестным азимутальным углом β : $\hat{s}(r, x, \beta)$. Параметр β для решения задачи формирования РЛИ является сопутствующим, не информативным. Для качественной фокусировки требуется его оценка по принятому двумерному сигналу $\hat{\xi}(r, x)$. Т.е. общая задача синтеза ставится как адаптивная: требуется предварительно оценить опорный двумерный сигнал $\hat{s}(r, x, \hat{\beta})$.

Существует большое количество подходов к решению адаптивных задач (задач с априорной параметрической неопределённостью). Один из приемов [5] заключается в разбиении области возможных значений неизвестного параметра на незначительные (для обеспечения требуемой точности решения задачи) интервалы точками $\beta \in [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N]$, где β_i – центральные значения отдельных участков. Для каждого значения β_i проводится, в нашем случае, синтез РЛИ. Полученные изображения сравниваются по некоторому апостериорному критерию $J(\beta)$, на основе экстремума которого принимается решение об оценке $\hat{\beta}$. Общая схема многоканального алгоритма представлена на рис. 4.

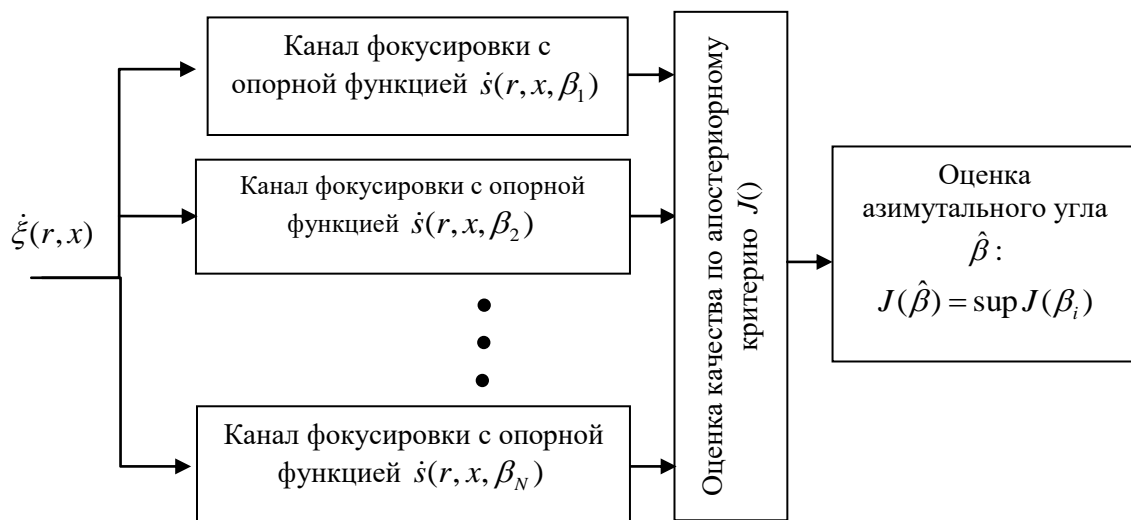


Рис.4. Схема многоканального алгоритма оценивания азимутального угла отворота луча антенны

В качестве критерия предлагается выбирать среднеквадратическую ошибку (СКО) амплитудного РЛИ, возможны и другие варианты. Критерий СКО имеет наглядную физическую интерпретацию: при наилучшем совпадении опорной функции с реальным сигналом отражателя обеспечивается максимальное качество фокусировки. В таком случае флуктуации амплитуд изображения будут наиболее интенсивными. Понятно, что такой критерий подходит к протяженным неоднородным сюжетам местности.

Строго оценить потенциальную точность оценки азимутального угла достаточно трудно. Вторая производная нормированной автокорреляционной функции в точке экстремума определяет дисперсию оценки. Автокорреляционная функция сигнала (1)

определяется двумерным интегралом: $B(\beta) = \iint_{R,L} \dot{s}(r, x, 0^\circ) \cdot \dot{s}^*(r, x, \beta) dr dx$ (значения R, L

определяют пространственную область двумерного сигнала), математически интегрирование провести довольно трудно.

Воспользуемся другим подходом, основанном на анализе ширины функции $B(\beta)$.

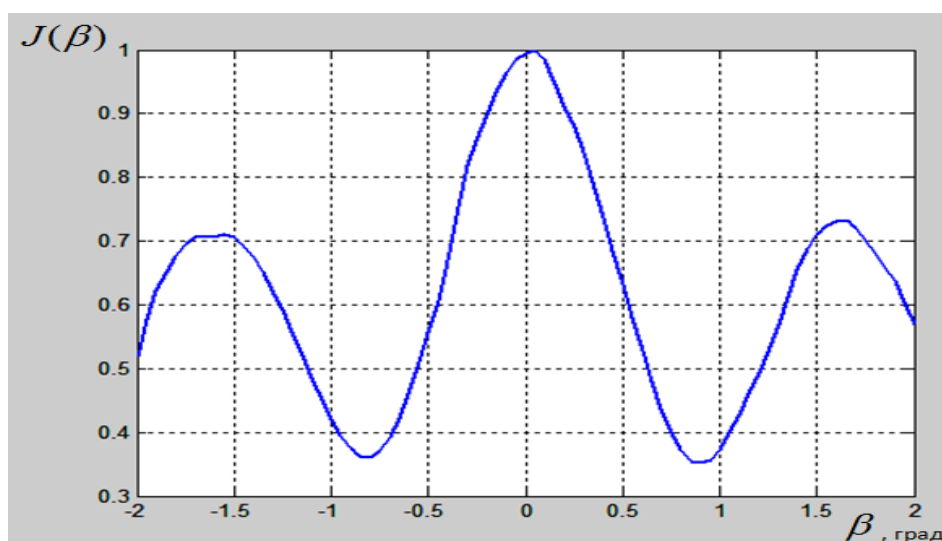
Рассмотрим принципиальную разницу между сигналами $\dot{s}(r, x, 0^\circ)$ и $\dot{s}(r, x, \beta)$ – сигнал при строго боковом обзоре и при обзоре, смещенном по углу азимута. При небольших β разница между сигналами будет заключаться только в линейном члене закона изменения дальности (см. соотношение (2)): $x \cdot \sin \beta \approx x \cdot \beta$. Примем, что пространственные разрешения по дальности и азимуту одинаковы. Если за ИС изменение линейного члена $x \cdot \beta$ составит величину, равную азимутальному разрешению, то можно считать, что сигналы $\dot{s}(r, x, 0^\circ)$ и $\dot{s}(r, x, \beta)$ эффективно пересекаются только на половине ИС, что пропорционально снижает амплитуду корреляционного пика так же в два раза. Тогда можно считать, что такое значение линейной миграции будет уже зафиксировано. Итак, для значения пространственного аргумента x равного L_c имеем приращение дальности, равное азимутальному разрешению ρ_x , откуда следует соотношение $L_c \cdot \beta = \rho_x$.

Учитывая [1, 3], что $L_c = \frac{\lambda \cdot r_0}{2 \cdot \rho_x}$, получим значение угла, определяющего точность измерения $\delta\beta$:

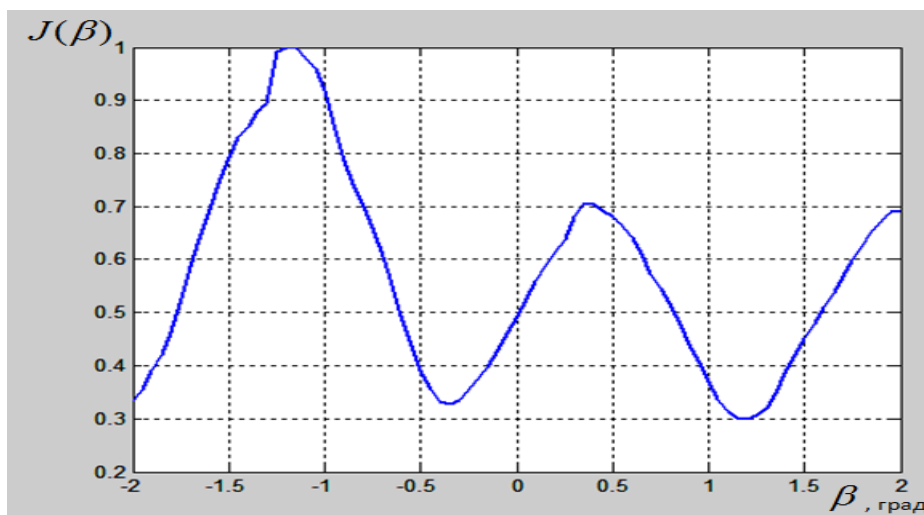
$$\delta\beta = \frac{\rho_x}{L_c} = \frac{2 \cdot \rho_x^2}{\lambda \cdot r_0}, \text{ рад.}$$

Понятно, что формула справедлива при миграции сигнала. Анализ ее показывает, что точность обратно пропорциональна наклонной дальности и длине волны излучения, и пропорциональна квадрату азимутального разрешения. Для типичных параметров современных РСА ошибка измерения составляет десятые-сотые доли градуса, что более чем достаточно для раскрытия неоднозначности.

Ниже, на рис. 5 представлены экспериментальные результаты измерения угла поворота луча антенны для РСА с зоной однозначности $[-0,75^\circ \dots +0,75^\circ]$.



а) $\beta \approx 0,05^\circ$ (боковой обзор)



б) $\beta \approx -1,2^\circ$ (скошенный обзор)

Рис.5. Нормированные результаты измерений критерия

В первом случае (рис.5а) оценка угла β оказалась порядка $\beta \approx 0,05^\circ$, что позволило рассматривать как нормальный боковой. Во втором случае (рис.5б) многоканальный алгоритм выявил смещение $\beta \approx -1,2^\circ$, поэтому для обработки радиоголограммы необходимо использование специализированных для скошенного режима съемки алгоритмы.

Результаты эксперимента демонстрируют возможность однозначного измерения угла отворота антенна (т.е. и за пределами зоны однозначности).

Литература

1. Радиолокационные системы воздушной разведки. Дешифрирование радиолокационных изображений / Л.А. Школьный, Е.Ф. Толстов, А.Н. Детков и др. Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 530 с.
2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора комического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 676 с.
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
4. Цветков О.Е., Ефимов А.В. Автокорреляционная функция двумерного сигнала РСА с миграцией по каналам дальности // Вопросы радиоэлектроники, серия Радиолокационная техника (РЛТ). – 2008. – Том 2. – Вып. 1. – С.91-102.
5. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 2004. – 608 с.
6. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.