

АЛГОРИТМ СИНТЕЗИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ МАЛОВЫСОТНОМ ПОЛЕТЕ

Заикин С.А., Мойбенко В.И., Парфиров В.А.

Введение

Задача формирования радиолокационного изображения (РЛИ) земной поверхности для обеспечения посадки при плохой видимости остается актуальной, хотя ей посвящен ряд работ [1,2]. Поскольку разрешение по азимуту в реальном луче в режиме маловысотного полета недостаточно, предложено использование синтезированной апертуры (СА) для радиовидения в передней зоне.

Особенностью режима СА в передней зоне является большое время синтеза, что в маловысотном полете (МВ) ведет к повышению влияния на качество РЛИ алгоритмов учета маневра. Если же синтезирование ведется при наблюдении в передней зоне сбоку, то более жесткими становятся требования и к алгоритмам учета фокусировки из-за значительной скорости и разницы скоростей линии визирования при наблюдении разных участков поверхности на небольших дальностях. Кроме того, при работе на небольших дальностях в РЛС используется значительная частота повторения импульсов, а сигнал от расположенной впереди поверхности, по которой строится РЛИ, отличается узкой полосой доплеровских частот. Это приводит к тому, что при фильтрации с помощью БПФ выполняются вычисления, большая часть результатов которых не требуется (тем более если точек фокусировки не одна, а несколько). В [3] предложены алгоритмы децимации для работы в таких условиях. Однако они ориентированы на режим доплеровского облучения луча, для которого учет маневра носителя и способ фокусировки не так существенны, и поэтому не рассматриваются. Эти вопросы частично отражены в последующих работах авторов, в частности в [4].

В настоящей работе предлагается двухступенчатый алгоритм с выполнением децимации с помощью фильтров первой ступени, отличающихся тем, что их главная задача - это учет маневра носителя РЛС. Последующий алгоритм ДПФ выполняется в узкой по

Рассматривается алгоритм синтеза апертуры, предназначенный для получения радиолокационного изображения поверхности в маловысотном полете на небольших дальностях, в условиях высокой неустойчивости траектории и высокой скорости линии визирования.

сравнению с частотой повторения полосе частот, чем достигается уменьшение объема вычислений. Этот алгоритм отличается возможностью учитывать фокусировку по большому числу точек на РЛИ практически без повышения объема вычислений, чем и достигается повышение качества фокусировки.

Алгоритм СА для получения РЛИ в режиме маловысотного полета

Структура алгоритма СА представлена на рис. 1. Навигационные данные, необходимые для формирования опорных функций, включают такие характеристики, как мгновенная скорость носителя, угловая скорость разворота, начальные значения угла визирования на поверхность, расстояния и некоторые другие.

Получение выборок отсчетов АЦП, поступающих на вход первой ступени, иллюстрируется рис.2. В каждом временном интервале наблюдения излучается N_{imp} зондирующих импульсов (ЗИ). В зоне приема сигнала между двумя соседними ЗИ регистрируются отсчеты АЦП $A(i)$, $i=1 \dots I_{str}$, количество I_{str} которых соответствует количеству анализируемых стробов дальности. Каждому i -му отсчету АЦП циклограммы соответствует своя выборка из N_{imp} элементов, по числу ЗИ в интервале наблюдения, формируемая из отсчетов АЦП с одинаковыми номерами в каждой зоне приема сигнала. На вход фильтра первой ступени поступают реальная и мнимая составляющие I_{str} таких выборок.

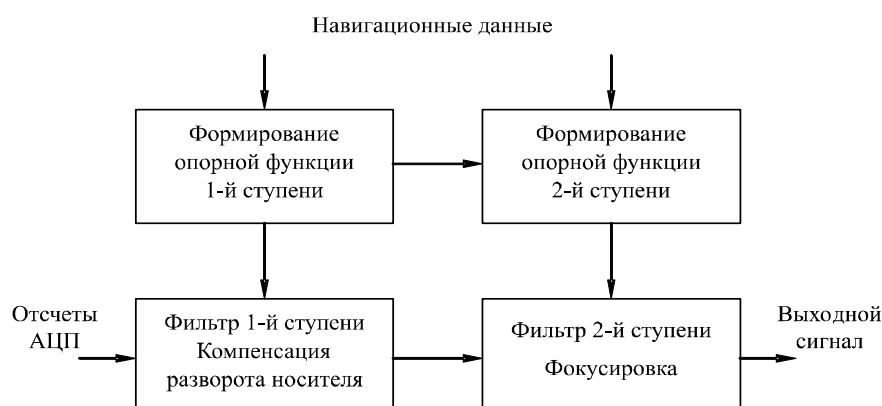


Рис. 1. Структура алгоритма СА

Фильтрация сигнала на первой ступени представляет собой комплексное умножение и суммирование принятых выборок входного накопленного массива на опорную функцию в соответствии с формулами:

$$\text{Re}l_{in} = \sum_{j=(n-1) \cdot K1+1}^{n \cdot K1} (\text{Re}i_{ij} \cdot \cos \varphi_j + \text{Im}i_{ij} \cdot \sin \varphi_j),$$

$$\text{Im}l_{in} = \sum_{j=(n-1) \cdot K1+1}^{n \cdot K1} (\text{Im}i_{ij} \cdot \cos \varphi_j - \text{Re}i_{ij} \cdot \sin \varphi_j),$$

$$i = \overline{1, I_{str}}; n = \overline{1, N} = \frac{N_{imp}}{K1},$$

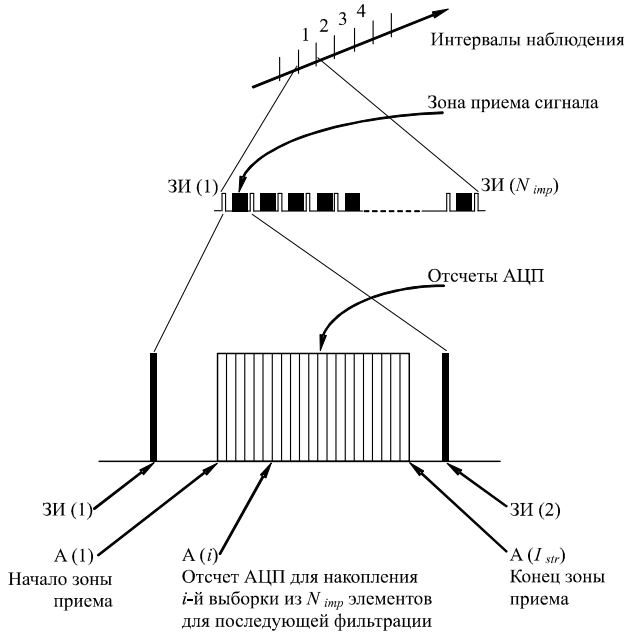


Рис. 2. Циклограмма получения отсчетов АЦП

На рис. 2: I_{str} - количество отсчетов АЦП (стробов дальности); N_{imp} - размер пачки – количество импульсов в выборке по i -му отсчету АЦП, равное количеству ЗИ за время наблюдения; $K1$ - количество импульсов, суммируемых на первой ступени по каждому отсчету (стробу дальности); N - количество импульсов на выходе первой ступени по каждому отсчету; $\text{Re}i_{ij}, \text{Im}i_{ij}, i = \overline{1, I_{str}}; j = \overline{1, N_{imp}}$ - соответственно реальная и мнимая составляющие сигнала на входе первой ступени по i -му отсчету АЦП для j -го импульса в пачке; $\text{Re}l_{in}, \text{Im}l_{in}, i = \overline{1, I_{str}}; n = \overline{1, N}$ - соответственно реальная и мнимая составляющие сигнала по i -му отсчету АЦП для n -го импульса на выходе первой ступени; $\varphi_j, j = \overline{1, N_{imp}}$ - фаза опорной функции для j -го импульса в пачке, град.

Фаза опорной функции для j -го импульса в пачке вычисляется в соответствии с уравнением

$$\varphi_j = \varphi_{j-1} + 2\pi \cdot Fd_j \cdot dt,$$

где Fd_j - частота Доплера для j -го импульса в пачке, Гц; dt - период повторения ЗИ, с.

Частота Доплера для j -го импульса в пачке определяется следующим образом:

$$Fd_j = \frac{2 \cdot V_j}{\lambda} \cdot \cos \beta_j, \quad (1)$$

где V_j - скорость носителя, соответствующая j -му импульсу, м/с; λ - длина волны несущей частоты ЗИ, м; β_j - азимут на точку фокусировки, изменяющийся вследствие разворота носителя, для j -го импульса в пачке, град.

Учет разворота носителя в алгоритме СА иллюстрируется на рис. 3. Как видно из рис. 3, справедливы следующие соотношения:

$$\beta_j = \beta_{j-1} + \Delta\beta_j,$$

$$\Delta\beta_j = \omega_{j-1} \cdot dt,$$

$$\beta_j = \beta_0 + \Delta\beta_{\Sigma j},$$

$$\Delta\beta_{\Sigma j} = \sum_{k=1}^{j-1} \omega_k \cdot dt,$$

где $\Delta\beta_j$ - приращение угла поворота на цель ДНА для j -го импульса в пачке вследствие разворота носителя в момент времени t_j , град; $\Delta\beta_{\Sigma j}$ - суммарное приращение положения на точку фокусировки ДНА для j -го импульса в пачке вследствие разворота носителя в момент времени t_j , град; ω_{j-1} - угловая скорость разворота носителя для $(j-1)$ -го импульса в момент времени t_{j-1} , град/с; β_0 - заданное начальное значение угла поворота на точку фокусировки ДНА в момент времени t_1 , град.

Так как тригонометрические функции при их программировании требуют большого объема вычислений, то используется рекуррентный способ вычисления значений $\cos \beta_j$ в формуле (1) с разложением тригонометрических функций в ряд Тейлора, справедливым по числу членов для малых углов w , в виде

$$\sin w = w - \frac{w^3}{6}, \quad (2)$$

$$\cos w = 1 - \frac{w^2}{2}. \quad (3)$$

Отсюда, с использованием тригонометрических формул сложения и с учетом малости $\Delta\beta_j$, следует:

$$\begin{aligned} \cos \beta_j &= \cos(\beta_{j-1} + \Delta\beta_j) = \\ &= \cos \beta_{j-1} \cdot \left(1 - \frac{\Delta\beta_j^2}{2}\right) - \sin \beta_{j-1} \cdot \left(\Delta\beta_j - \frac{\Delta\beta_j^3}{6}\right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin \beta_j &= \sin(\beta_{j-1} + \Delta\beta_j) = \\ &= \sin \beta_{j-1} \cdot \left(1 - \frac{\Delta\beta_j^2}{2}\right) + \cos \beta_{j-1} \cdot \left(\Delta\beta_j - \frac{\Delta\beta_j^3}{6}\right). \end{aligned}$$

Начальными условиями в момент времени t_1 для 1-го импульса пачки ($j=1$) на входе первой ступени являются:

$$\begin{aligned} \varphi_j &= \varphi_1 = 0, \\ \beta_j &= \beta_1 = \beta_0, \\ \cos \beta_j &= \cos \beta_1 = \cos \beta_0, \\ \sin \beta_j &= \sin \beta_1 = \sin \beta_0. \end{aligned}$$

При выполнении вычислений на второй ступени алгоритма СА используются угол отклонения от первоначального курса вследствие разворота носителя для n -го импульса на входе второй ступени B_n , град и проекция скорости носителя на первоначальное направление W_n , м/с, определяемые по формулам

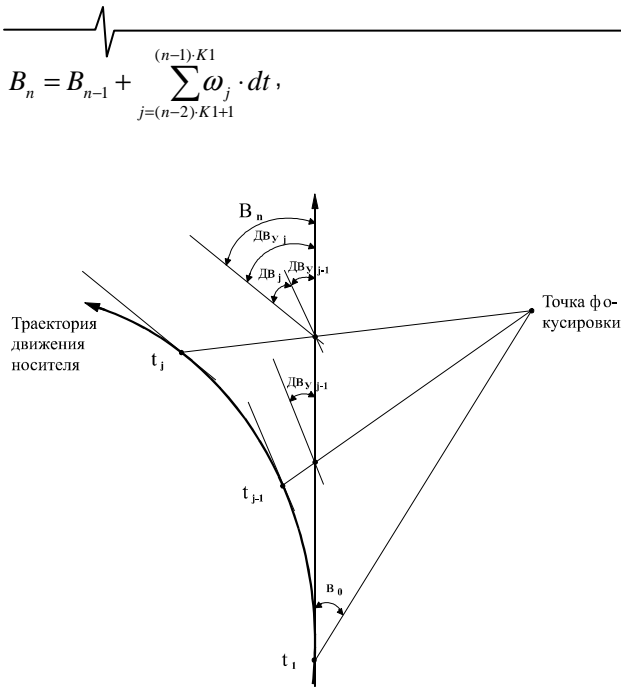


Рис. 3. Учет разворота носителя в первой ступени

$$W_n = V_{nK1} \cdot \cos B_n,$$

$$n = \overline{1, N}$$

с начальным условием $B_n = 0$ при $n=1$.

Фильтрация сигнала на второй ступени реализуется комплексным умножением переданных выборок выходного накопленного массива первой ступени на опорную функцию второй ступени в соответствии с формулами:

$$\text{Re}2_{im} = \sum_{n=(m-1)K2+1}^{mK2} (\text{Re}1_{in} \cdot \cos \psi_n + \text{Im}1_{in} \cdot \sin \psi_n),$$

$$\text{Im}2_{im} = \sum_{n=(m-1)K2+1}^{mK2} (\text{Im}1_{in} \cdot \cos \psi_n - \text{Re}1_{in} \cdot \sin \psi_n),$$

$$i = \overline{1, I_{str}}; m = \overline{1, M} = \frac{N}{K2} = \frac{N_{imp}}{K1 \cdot K2},$$

где I_{str} - количество отсчетов АЦП; N_{imp} - размер пачки первой ступени – количество импульсов в выборке по i -му отсчету, равное количеству ЗИ за время наблюдения; $K1$ - количество импульсов, суммируемых на первой ступени по каждому отсчету АЦП; $K2$ - количество импульсов, суммируемых на второй ступени по каждому отсчету АЦП; N - количество импульсов на выходе первой ступени по каждому отсчету АЦП; M - количество импульсов на выходе второй ступени по каждому отсчету АЦП; $\text{Re}2_{im}, \text{Im}2_{im}, i = \overline{1, I_{str}}; m = \overline{1, M}$ - соответственно реальная и мнимая составляющие сигнала на выходе второй ступени по i -му отсчету АЦП для m -го импульса; $\text{Re}1_{in}, \text{Im}1_{in}, i = \overline{1, I_{str}}; n = \overline{1, N}$ - соответственно реальная и мнимая составляющие сигнала по i -му отсчету АЦП для n -го импульса на выходе первой ступени; $\psi_n, n = \overline{1, N}$ - фаза опорной функции для n -го импульса, град.

Фаза опорной функции второй ступени включает составляющую, рассчитанную с учетом фокусировки, основанной на вычислении текущего значения скорости Доплера по углу между скоростью носителя и по-

ложением биссектрисы ДНА. Учет фокусировки в алгоритме СА иллюстрируется рис. 4.

Фаза опорной функции второй ступени для n -го импульса вычисляется в соответствии с уравнением

$$\psi_n = \psi_{n-1} + 2\pi \cdot FD_n \cdot dt,$$

где FD_n - частота Доплера для n -го импульса, Гц; dt - период повторения ЗИ, с.

Частота Доплера для n -го импульса определяется следующим уравнением:

$$FD_n = \frac{2 \cdot VD_n}{\lambda},$$

где VD_n - скорость Доплера для n -го импульса, м/с – проекция скорости носителя на ось, направленную на цель.

В соответствии с определением для скорости Доплера

$$\begin{aligned} VD_n &= V_{nK1} \cdot \cos(\gamma_n + B_n) = \\ &= V_{nK1} \cdot (\cos \gamma_n \cdot \cos B_n - \sin \gamma_n \cdot \sin B_n) \end{aligned} \quad (4)$$

и $\gamma_n = \gamma_{n-1} + \Delta\gamma_n$,

где V_{nK1} - скорость носителя, соответствующая $(n \cdot K1)$ -му импульсу первой ступени, м/с; B_n - угол отклонения от первоначального курса вследствие разворота носителя для n -го импульса на входе второй ступени, град; γ_n - угол направления на цель при движении по прямой первоначального курса носителя для n -го импульса на входе второй ступени, град.; $\Delta\gamma_n$ - изменение угла направления на цель вследствие движения по прямой для n -го импульса на входе второй ступени, град.

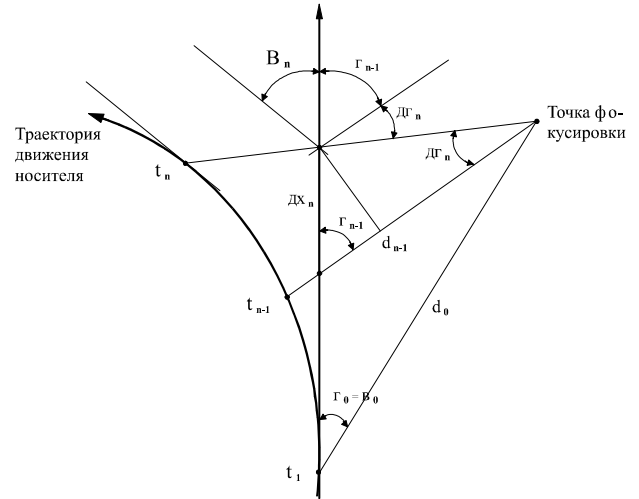


Рис. 4. Учет фокусировки во второй ступени

Как видно из рис. 4, справедливы следующие соотношения:

$$\Delta\gamma_n = \arctg \frac{\Delta x_n \cdot \sin \gamma_{n-1}}{d_{n-1} - \Delta x_n \cdot \cos \gamma_{n-1}}, \quad (5)$$

$$\Delta x_n = W_n \cdot K1 \cdot dt = V_{nK1} \cdot \cos B_n \cdot K1 \cdot dt,$$

$$d_n = \frac{d_{n-1} - \Delta x_n \cdot \cos \gamma_{n-1}}{\cos \Delta\gamma_n}, \quad (6)$$

где Δx_n - перемещение носителя за время между $K1$ отсчетами по прямой начального курса для n -го вы-

ходного импульса первой ступени, м; d_n - текущая дальность до цели при движении по прямой для n -го импульса, м; W_n - проекция скорости носителя на первоначальное направление, м/с.

С использованием формул (2) и (3), а также формулы $\text{arctg } w = w - \frac{w^3}{3}$ - разложения тригонометрических

функций в ряд Тейлора для малых углов w применительно к углам B_n и $\Delta\gamma_n$, соотношения (4), (5), (6) принимают следующий вид:

$$VD_n = V_{n.K1} \cdot \left(\cos \gamma_n \cdot \left(1 - \frac{B_n^2}{2} \right) - \sin \gamma_n \cdot \left(B_n - \frac{B_n^3}{6} \right) \right),$$

$$\Delta\gamma_n = \frac{\Delta x_n \cdot \sin \gamma_{n-1}}{d_{n-1} - \Delta x_n \cdot \cos \gamma_{n-1}} - \frac{\left(\frac{\Delta x_n \cdot \sin \gamma_{n-1}}{d_{n-1} - \Delta x_n \cdot \cos \gamma_{n-1}} \right)^3}{3},$$

$$\Delta x_n = V_{n.K1} \cdot K1 \cdot dt \cdot \left(1 - \frac{B_n^2}{2} \right),$$

$$d_n = \frac{d_{n-1} - \Delta x_n \cdot \cos \gamma_{n-1}}{1 - \frac{\Delta\gamma_n^2}{2}}.$$

Рекуррентное вычисление значений величин $\cos \gamma_n$ и $\sin \gamma_n$ производится аналогично ранее приведенным соотношениям и имеет вид

$$\cos \gamma_n = \cos(\gamma_{n-1} + \Delta\gamma_n) = \cos \gamma_{n-1} \cdot \left(1 - \frac{\Delta\gamma_n^2}{2} \right) -$$

$$- \sin \gamma_{n-1} \cdot \left(\Delta\gamma_n - \frac{\Delta\gamma_n^3}{6} \right);$$

$$\sin \gamma_n = \sin(\gamma_{n-1} + \Delta\gamma_n) =$$

$$\sin \gamma_{n-1} \cdot \left(1 - \frac{\Delta\gamma_n^2}{2} \right) + \cos \gamma_{n-1} \cdot \left(\Delta\gamma_n - \frac{\Delta\gamma_n^3}{6} \right).$$

Начальными условиями в момент времени t_1 для 1-го импульса второй ступени ($n=1$) являются:

$$\psi_n = \psi_1 = 0, \quad B_n = B_1 = 0, \quad d_n = d_1 = d_0,$$

$$\gamma_n = \gamma_1 = \gamma_0 = \beta_0, \quad \cos \gamma_n = \cos \gamma_1 = \cos \gamma_0 = \cos \beta_0,$$

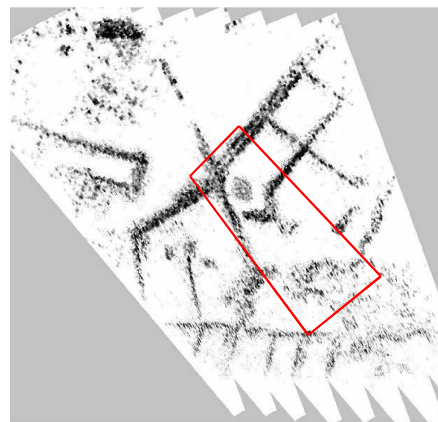
$$\sin \gamma_n = \sin \gamma_1 = \sin \gamma_0 = \sin \beta_0.$$

Здесь d_0 - начальное значение дальности до точки фокусировки.

Алгоритмы второй ступени, реализованные в виде 500..700 фильтров в полосе 50..70 Гц по сравнению с БПФ в полосе частот повторения 7..10 кГц дают выигрыш по числу фильтров на два порядка, к тому же реализация БПФ на 61440 точек затруднена. Это определяет выигрыш в объеме вычислений, но его более точная оценка затруднена тем, что выбор коэффициента децимации требует дополнительных исследований. С учетом разбиения РЛИ на значительное число точек фокусировки этот выигрыш значительно возрастает, но выбор числа точек фокусировки также требует дополнительных исследований (см. рис.5).

Проверка на моделях и результаты летных экспериментов подтверждают работоспособность приведенного алгоритма СА. Для примера на рис.5 показаны радиолокационное изображение и фотография соответствующего участка местности. РЛИ получено на дальности 0.3..3 км в зоне впереди сбоку, с помощью установленной на

борту вертолета дециметровой РЛС, что определяет большое время синтезирования, а из-за малых дальностей и высокую скорость и большую разницу в скорости линии визирования в пределах РЛИ. Тем самым РЛИ иллюстрирует работу алгоритма, когда учет фокусировки и маневра особенно важен.



Заключение

Для режима синтезирования апертуры в условиях маловысотного полета целесообразно использование рассмотренного алгоритма на основе многоскоростной фильтрации, в котором децимация выполняется с учетом нестабильности полета летательного аппарата, а дальнейшая фильтрация выполняется с учетом фокусировки в условиях большой скорости линии визирования на много точек поверхности в пределах РЛИ. Предлагаемый алгоритм позволяет также сократить объем вычислений тригонометрических функций при вычислении ДГФ.

Литература

1. Орлов М.С. Авиационная радиолокационная станция с синтезированной апертурой антенны и передним обзором земной поверхности // Радиотехника, 2003, № 1.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение в передней зоне обзора бортовой радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны // Радиотехника. 2004, № 1.
3. Витязев В.В., Колодько Г.Н., Витязев С.В. Способы и алгоритмы формирования радиолокационного изображения в режиме доплеровского облучения луча // Цифровая обработка сигналов, 2006, № 3.
4. Витязев В.В., Колодько Г.Н., Воронков Д.В. Формирование радиолокационного изображения в режиме фокусируемого синтезирования апертуры ДНА // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 4. -С. 34-40.