

УДК 621.396

С.А. Юкин, В.Г. Андреев

КОРРЕКЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ, ФОРМИРУЕМОГО В РЕЖИМЕ ДОПЛЕРОВСКОГО ОБУЖЕНИЯ ЛУЧА

Предлагается метод коррекции искажений радиолокационного изображения, формируемого бортовыми радиолокационными системами с доплеровским обужением луча, в передней полусфере при маловысотном полете. Компенсация влияния паразитных изодопных составляющих осуществляется на основе информации, получаемой со вспомогательного приёмного канала. Выигрыш в сравнении с классическим методом доплеровского обужения составляет 13,67 дБ для анализируемой радиолокационной ситуации.

Введение

При полете на малых и предельно малых высотах с большими скоростями повышаются требования к адекватности и своевременности информации об окружающем летательный аппарат пространстве. Необходимая информация предоставляется бортовой цифровой вычислительной системой, обеспечивающей высокую вычислительную производительность, которая постоянно наращивается и на текущий момент составляет более 10 миллиардов операций в секунду при реализации модулей цифровой обработки сигналов на базе сигнальных процессоров и ПЛИС. Это позволяет реализовать обработку больших массивов данных в реальном масштабе времени и повысить адекватность предоставляемой информации за счет использования дополнительных процедур обработки.

Среди бортовых источников информации важную роль играют бортовые радиолокационные системы (БРЛС), обладающие высокой степенью инвариантности к погодным, климатическим и временным условиям функционирования. Вместе с тем БРЛС уступают оптическим системам по детальности изображения [1, 2]. Для устранения этого недостатка в БРЛС используются различные алгоритмы обработки и режимы работы.

Одним из используемых в современных БРЛС режимов работы является режим доплеровского обужения луча (ДОЛ) [3]. Он даёт возможность селекции отражений, поступающих по главному лепестку (ГЛ) диаграммы направленности антенны (ДНА), от отражений по боковым лепесткам (БЛ) [4, 5]. При маловысотном полете в режиме обхода препятствий (обзор в передней полусфере), сложности селекции спектральных составляющих, соответствующих ГЛ ДНА, свя-

заны с их искажением отражениями, приходящими по БЛ ДНА в пределах одной изодопы. Это приводит к искажению отображаемой информации, т.к. возрастает яркость на экране индикатора, соответствующая мощности отраженного сигнала в анализируемом элементе разрешения [5]. Эти искажения можно было бы скомпенсировать при наличии априорных данных о форме всей ДНА, но на практике достоверно известна только форма ГЛ ДНА, а БЛ имеют сильно изрезанную форму, которая зависит от направления ГЛ ДНА, высоты полета носителя БРЛС и ряда других параметров.

Цель работы – разработка метода коррекции искажений, обусловленных отражениями по БЛ ДНА, путём размещения на борту дополнительной всенаправленной антенны для формирования вспомогательного приёмного канала и использования получаемой от него информации для компенсации влияния паразитных изодопных составляющих.

Теоретическая часть

Рассмотрим процесс формирования радиолокационного изображения (РЛИ) в БРЛС.

На входе приемника мощность отражения от элемента разрешения поверхности с угловыми координатами (α, β) относительно пространственного положения носителя РЛС (см. рисунок 1), определяется выражением [5]:

$$P_{\text{пр}}(\alpha, \beta) = \frac{P_{\text{пер}} \lambda^2 G_{\text{пер}}(\alpha, \beta) G_{\text{пр}}(\alpha, \beta)}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \times \rho(\alpha, \beta) S(\alpha, \beta), \quad (1)$$

где α – азимут, β – угол места; $\rho(\alpha, \beta)$ – усредненный по элементу разрешения коэффициент отражения; $S(\alpha, \beta)$ – эффективная площадь (с учетом угла скольжения электромагнитного излучения)

разрешаемого сегмента; $G_{\text{пер}}(\alpha, \beta)$ – коэффициент усиления (КУ) ДНА передатчика в анализируемом направлении; $G_{\text{пр}}(\alpha, \beta)$ – КУ ДНА приемника в анализируемом направлении; $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика; λ – длина волны излучаемого колебания; R – наклонная дальность до элемента разрешения.

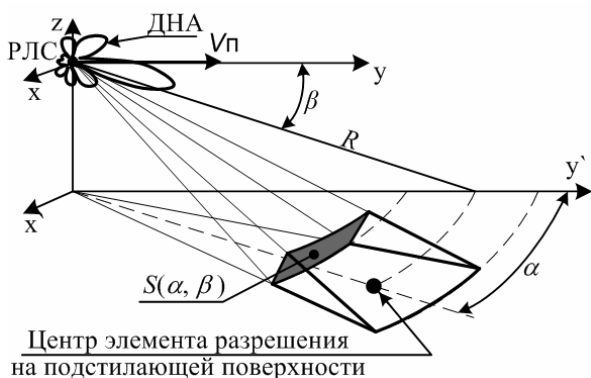


Рисунок 1

Матрица радиолокационного изображения в БРЛС формируется построчно (по строкам дальности), поэтому зафиксируем анализируемую строку матрицы, т.е. анализ осуществляем в одном кольце дальности. Усредним расстояние в пределах строки дальности, положив его равным расстоянию до середины строки. Объединим величины в выражении (1), не зависящие от пространственного положения и характеристик разрешаемого сегмента поверхности, в нормирующий множитель k : $k = P_{\text{пер}} \cdot \lambda^2 / (4\pi)^3 \cdot R^4$. Также объединим компоненты, определяющие характеристики элемента разрешения, в величину $C(\alpha, \beta)$: $C(\alpha, \beta) = \rho(\alpha, \beta) \cdot S(\alpha, \beta)$.

Перепишем выражение (1) с учетом сделанных обозначений:

$$P_{\text{пр}}(\alpha, \beta) = k G_{\text{пер}}(\alpha, \beta) G_{\text{пр}}(\alpha, \beta) C(\alpha, \beta). \quad (2)$$

Перейдем от угловых координат в спектральную область, формируя таким образом доплеровский портрет получаемого отражения от разрешаемого элемента поверхности при каждом направлении ГЛ ДНА в пространстве (столбцы матрицы формируемого изображения определяются положением ГЛ ДНА в азимутальной плоскости). Для этого воспользуемся известным соотношением, связывающим угловое положение точки в пространстве с углом, образующим конус равных доплеровских скоростей [4]:

$$\cos(\gamma) = \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta). \quad (3)$$

Разрешение по углу γ , то есть ширина ребра формируемого конуса (в сечении поверхностью, параллельной вектору путевой скорости, образуется изодопы) однозначно связана с шири-

ной ($\Delta f_{\text{дк}}$) и номером (l) доплеровского канала: $\Delta \gamma_l = f(\Delta f_{\text{дк}}, l) = \gamma_l - \arccos[\lambda(1+l)\Delta f_{\text{дк}} / 2V_{\text{п}}]$, $l = 0, L-1$, где $V_{\text{п}}$ – путевая скорость носителя РЛС, L – число доплеровских каналов.

Преобразуем выражение (2) с учетом выражения (3):

$$P_{\text{пр}}(l) = k \cdot G_{\text{пер}}(l) \cdot G_{\text{пр}}(l) \cdot C(l), \quad (4)$$

где $C(l) = \int_{\Delta \gamma_l} C(\alpha, \beta) d\gamma$,

$$G_{\text{пер}}(l) = \int_{\Delta \gamma_l} G_{\text{пер}}(\alpha, \beta) d\gamma, \quad G_{\text{пр}}(l) = \int_{\Delta \gamma_l} G_{\text{пр}}(\alpha, \beta) d\gamma$$

Пусть ГЛ ДНА занимает N дискретных положений в пространстве (зададимся сектором сканирования только в азимутальной плоскости, т.е. зафиксируем направление ГЛ ДНА по углу места) в пределах анализируемого строка дальности. При этом имеются симметричные относительно направления вектора путевой скорости носителя положения ГЛ – дискреты n_1 и n_2 , а соответствующие им азимуты α_{n_1} , α_{n_2} (соответственно) отличаются знаком: $\alpha_{n_1} = -\alpha_{n_2}$ (см. рисунок 2).

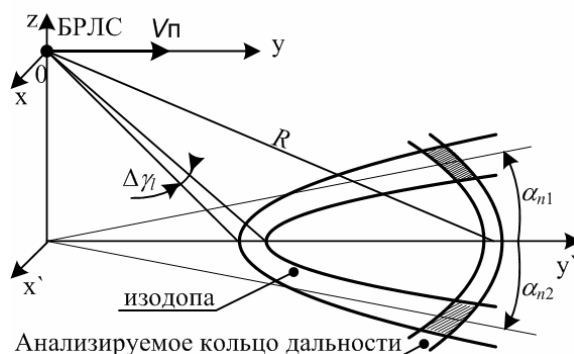


Рисунок 2

Учитывая сложение мощностей изодопных составляющих [5], получаем соотношение, определяющее спектральную мощность отражений от подстилающей поверхности в l -м доплеровском канале при направлении ГЛ ДНА α_{n_1} , соответствующем дискрету n_1 :

$$P_{\text{пр}}(l, n_1) = k \cdot [G_{\text{пер}}(l, n_1) \cdot G_{\text{пр}}(l, n_1) \cdot C(l, n_1) + G_{\text{пер}}(l, n_2) \cdot G_{\text{пр}}(l, n_2) \cdot C(l, n_2)], \quad (5)$$

где (при использовании одной приемопередающей антенны) $G_{\text{пер}}(l, n_1) \cdot G_{\text{пр}}(l, n_1) = G^2(l, n_1)$ – квадрат КНД по азимутальному направлению α_{n_1} , которое соответствует направлению ГЛ ДНА ($G^2(l, n_1) = G_{\text{ГЛ}}^2$);

$G_{\text{пер}}(l, n_2) \cdot G_{\text{пр}}(l, n_2) = G_{\text{БЛ}}^2(n_2)$ – квадрат КНД по БЛ в направлении \hat{r}_{n_2} при направлении ГЛ ДНА α_{n_1} ; $C(l, n_1)$ и $C(l, n_2)$ – характеристики элементов разрешения находящихся под углами α_{n_1} и α_{n_2} соответственно.

Положениям ГЛ α_{n_1} и α_{n_2} , согласно выражению (5), соответствуют два варианта распределения мощности на входе приемника по спектральным компонентам. В результате для анализируемого l -го доплеровского канала получим два уравнения ($P_{\text{пр}}(n_1), P_{\text{пр}}(n_2)$) с 4-мя неизвестными ($C(n_1), C(n_2), G_{\text{БЛ}}^2(n_1), G_{\text{БЛ}}^2(n_2)$). Для их нахождения необходимо сформировать еще два уравнения. Эти уравнения могут быть получены при помощи дополнительного канала приема, который предлагается реализовать с помощью равнонаправленной в передней полусфере ДНА с КНД равным $G_{\text{д}}$. Одним из вариантов организации двух ДНА может служить разделение информации с одной вертикальной линейки фазированной антенной решетки на основной канал приема и дополнительный. Тогда мощности $P_{\text{пр}}$, $P_{\text{прд}}$ на выходах основного и дополнительного каналов приема (соответственно) в l -м доплеровском канале могут быть выражены нелинейной системой уравнений:

$$\begin{cases} k \cdot [G_{\text{ГЛ}}^2 C(n_1) + G_{\text{БЛ}}^2(n_2) C(n_2)] = P_{\text{пр}}(n_1) \\ k \cdot [G_{\text{БЛ}}^2(n_1) C(n_1) + G_{\text{ГЛ}}^2 C(n_2)] = P_{\text{пр}}(n_2) \\ k \cdot [G_{\text{ГЛ}} G_{\text{д}} C(n_1) + G_{\text{БЛ}}(n_2) G_{\text{д}} C(n_2)] = P_{\text{прд}}(n_1) \\ k \cdot [G_{\text{БЛ}}(n_1) G_{\text{д}} C(n_1) + G_{\text{ГЛ}} G_{\text{д}} C(n_2)] = P_{\text{прд}}(n_2) \end{cases} \quad (6)$$

Матричная запись системы уравнений (6) может быть представлена следующим образом: $k \cdot \mathbf{G}_{\text{пер}} \mathbf{G}_{\text{пр}} \mathbf{C} = \mathbf{P}_{\text{пр}}$, где $\mathbf{C}^T = \|C(n_1) \ C(n_2)\|$ – вектор характеристик поверхности с симметричных направлений \hat{r}_{n_1} и \hat{r}_{n_2} , $\mathbf{P}_{\text{пр}}^T = \|P_{\text{пр}}(n_1) \ P_{\text{пр}}(n_2) \ P_{\text{прд}}(n_1) \ P_{\text{прд}}(n_2)\|$ – вектор мощностей на входе приемника, $\mathbf{G}_{\text{пер}}$ – матрица КУ передающей антенны, $\mathbf{G}_{\text{пр}}$ – матрица КУ приемной антенны. Матрицы $\mathbf{G}_{\text{пер}}$ и $\mathbf{G}_{\text{пр}}$ имеют вид:

$$\mathbf{G}_{\text{пер}} = \begin{pmatrix} G_{\text{ГЛ}} & 0 & 0 & G_{\text{БЛ}}(n_2) & 0 & 0 \\ 0 & G_{\text{БЛ}}(n_1) & 0 & 0 & G_{\text{ГЛ}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{\text{ГЛ}} & 0 & 0 & G_{\text{БЛ}}(n_2) \\ 0 & 0 & G_{\text{БЛ}}(n_1) & 0 & 0 & G_{\text{ГЛ}} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{G}_{\text{пр}}^T = \begin{pmatrix} G_{\text{ГЛ}} & G_{\text{БЛ}}(n_1) & G_{\text{д}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{\text{БЛ}}(n_2) & G_{\text{ГЛ}} & G_{\text{д}} \end{pmatrix},$$

где символ T обозначает математическую операцию транспонирования.

Решение системы (6) дает возможность получить оценки характеристик $C(n_1), C(n_2)$ отражения разрешаемых элементов поверхности с соответствующих направлений $\alpha_{n_1}, \alpha_{n_2}$, а также

КУ БЛ $G_{\text{БЛ}}^2(n_1), G_{\text{БЛ}}^2(n_2)$, имеющие смысл весовых коэффициентов паразитных вкладов элементов поверхности в результирующую мощность в пределах одной изодопы. Это позволяет оценить истинную мощность отражения с интересующего нас направления, скорректировав искажения, обусловленные паразитной изодопной составляющей.

Для решения систем уравнений, подобных (6), обычно используют численные методы, которые требуют задания начального приближения с последующим его уточнением. В качестве такого начального приближения может использоваться решение, полученное из предположения о симметричности форм БЛ ($G_{\text{БЛ}}(n_1) = G_{\text{БЛ}}(n_2)$) относительно ГЛ ДНА. В большинстве случаев начальное приближение и будет близко к искомому решению, например, в случае использования фазированных антенных решеток при схожести фазовых искажений формы БЛ при электронном отклонении луча относительно нормали к плоскости антенны. С учетом сделанных допущений получим аналитическое решение системы (6) вида:

$$G_{\text{БЛ}} = \frac{G_{\text{д}} \cdot [A(n_2) \cdot P_{\text{пр}}(n_2) + A(n_1) \cdot P_{\text{пр}}(n_1)]}{A(n_2) \cdot P_{\text{прд}}(n_2) + A(n_1) \cdot P_{\text{прд}}(n_1)},$$

$$C(n_1) = \frac{G_{\text{д}} \cdot P_{\text{пр}}(n_2) - G_{\text{ГЛ}} \cdot P_{\text{прд}}(n_2)}{G_{\text{д}} \cdot k \cdot (G_{\text{БЛ}}^2 - G_{\text{ГЛ}} \cdot G_{\text{БЛ}})},$$

$$C(n_2) = \frac{G_{\text{д}} \cdot P_{\text{пр}}(n_1) - G_{\text{ГЛ}} \cdot P_{\text{прд}}(n_1)}{G_{\text{д}} \cdot k \cdot (G_{\text{БЛ}}^2 - G_{\text{ГЛ}} \cdot G_{\text{БЛ}})},$$

где $A(n_1) = G_{\text{д}} P_{\text{пр}}(n_1) - G_{\text{ГЛ}} P_{\text{прд}}(n_1)$,

$A(n_2) = G_{\text{д}} P_{\text{пр}}(n_2) - G_{\text{ГЛ}} P_{\text{прд}}(n_2)$.

В итоге, зная характеристики отражения разрешаемых элементов поверхности с соответствующих направлений и КУ БЛ ДНА, можем оценить истинную величину мощности на входе приемника с анализируемого направления $P_{\text{пр}}^*(n_i)$, осуществив компенсацию паразитных изодопных составляющих:

$$\begin{aligned} P_{\text{пр}}^*(n_1) &= P_{\text{пр}}(n_1) - k G_{\text{БЛ}}^2(n_2) C(n_2), \\ P_{\text{пр}}^*(n_2) &= P_{\text{пр}}(n_2) - k G_{\text{БЛ}}^2(n_1) C(n_1). \end{aligned} \quad (7)$$

Экспериментальная часть

Для оценки работоспособности предложенной методики была построена имитационная модель функционирования БРЛС, связывающая математическое описание радиоотражений от подстилающей поверхности с процедурой генерации случайного процесса, подобного реальным эхосигналам.

Карта местности, используемая для формирования радиолокационного изображения, с указанием местоположения носителя БРЛС и сектора сканирования, представлена на рисунке 3.

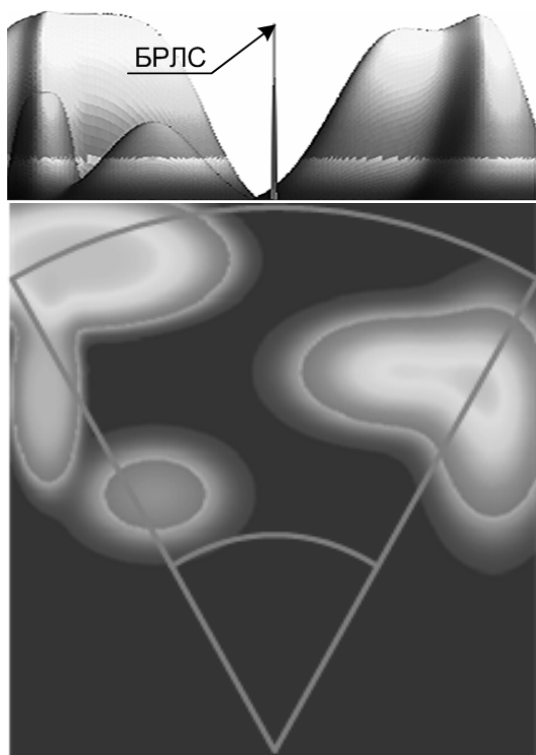


Рисунок 3

Моделирование РЛИ проводилось при следующих параметрах БРЛС: ширина ДНА в азимутальной плоскости принята равной 2 градуса, в угломестной плоскости – 3 градуса; отклонение ГЛ ДНА относительно вектора путевой скорости по углу места принято равным -2 градуса; сектор сканирования составил 60 градусов; высота носителя БРЛС над поверхностью 100 м; измеряемая дальность 3000 м; $\lambda = 0,03$ м; ширина доплеровского канала 48,83 Гц; путевая скорость летательного аппарата 100 м/с. КУ БЛ ДНА относительно ГЛ ДНА составил -10 дБ, форма передающей ДНА определяется суммой двух функций: $|\text{sinc}(x)| = |\sin(x)/x|$ и сферой, необходимой для устранения нулей ДНА (-30 дБ), где $x = \sqrt{(\alpha - \alpha_0)^2 + (\beta - \beta_0)^2}$ (α_0 , β_0 – отклонение ГЛ ДНА от вектора путевой скорости, α , β – направления на сегменты поверхности).

При моделировании получены радиолокационные портреты местности в секторе сканирования при различных режимах работы БРЛС. Результаты приведены на рисунках 4 и 5.



а



б

Рисунок 4



а



б

Рисунок 5

Рисунок 4,а отражает ситуацию, когда РЛС работает в режиме реального луча (без доплеровского облучения). Визуально несложно видеть существенное отличие РЛИ от изображения, получаемого в режиме доплеровского облучения луча (рисунок 4,б). Для сравнения на рисунке 5,а приведено идеальное РЛИ, сформированное на основе ДНА, у которой в направлении паразитных изодопных составляющих нет боковых лепестков (КУ равны нулю).

Из сопоставления рисунков 4 и 5.а видно, что ДОЛ даёт возможность приблизить реальное РЛИ к идеальному в условиях паразитного воздействия отражений, поступающих по боковым лепесткам ДНА.

Однако, как отмечалось выше, в режиме ДОЛ при маловысотном полете в передней полусфере возникают искажения формируемого РЛИ, обусловленные отражениями в пределах одной изодопы по боковым лепесткам ДНА. Это приводит к неправильной интерпретации данных: например, при построении высоты рельефа используется протяженность радиолокационной тени [6], которая, как видно из рисунка 4,б, искажена. Очевидно, что чем сложнее рельеф и разнообразнее ландшафт подстилающей поверхности, определяющие коэффициент отражения, тем сильнее будет искажена радиолокационная картина местности. Предложенный метод коррекции РЛИ, реализуемый в соответствии с выражением (7), даёт возможность восстановить области радиолокационных теней и общую контрастность изображения (см. рисунок 5,б). В результате использования предложенного метода удается получить РЛИ, которое при сопоставлении с истинным (идеальным) РЛИ имеет расхождения только в области отражений, соответствующих некоторым углам γ . Отметим, что при заданном положении ГЛ ДНА в угломестной плоскости азимутальное направление ГЛ α однозначно связано выражением (3) с углом γ косинуса равных доплеровских скоростей. Ширина этих углов оказывается больше ширины ГЛ ДНА (режим ДОЛ не способен селективировать ГЛ), что приводит к просачиванию мощности отражений по БЛ ДНА не только в пределах изодопы с симметричного направления, но и с направления, соответствующего положению ГЛ, а в модели как априорная информация вводились данные только о форме главного лепестка ДНА.

Число искаженных угловых положений можно уменьшить увеличением ширины ГЛ ДНА (адекватность априорных данных сохраняется в большем диапазоне углов), уменьшением ширины доплеровских каналов или увеличением

априорно вводимых в алгоритм данных о форме диаграммы направленности антенны.

В качестве критерия оценки эффективности предложенного метода в сравнении с классическим алгоритмом ДОЛ найдем два нормы Δ_i вектора невязки \mathbf{V}^i :

$$\Delta_i = \|\mathbf{V}^i\|_2 = \sqrt{\sum_{j=0}^{M-1} (b_{j,i})^2}, \quad i = \overline{0, N-1}, \quad (8)$$

где \mathbf{V}^i – вектор-столбец формируемой разностной матрицы изображения (\mathbf{V}) при i -ом азимутальном направлении ГЛ ДНА (α_i), M – число стробов (колец) дальности. Матрицу \mathbf{V} находим как разность двух матриц РЛИ: матрицы, получаемой в анализируемом режиме работы БРЛС, и эталонной матрицы РЛИ. Отметим, что для удобства отображения результатов вводится нормирующий множитель, равный максимуму яркости эталонной матрицы РЛИ.

Кривые, характеризующие оцениваемую в соответствии с выражением (8) эффективность режимов работы БРЛС в анализируемом секторе сканирования, представлены на рисунке 6.

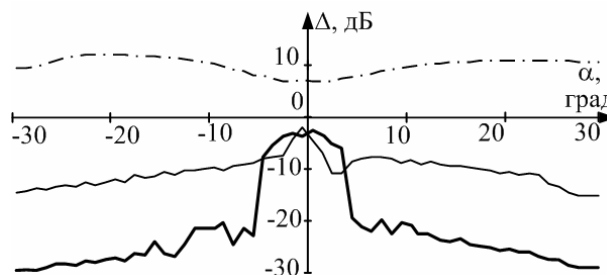


Рисунок 6

На рисунке 6 штрихпунктирная кривая соответствует режиму реального луча (без ДОЛ); тонкая сплошная – обычный режим ДОЛ; сплошная жирная – предлагаемый режим ДОЛ с коррекцией формируемой матрицы РЛИ. Наглядно виден выигрыш режима ДОЛ по сравнению с режимом реального луча во всем секторе сканирования.

Для обобщенной оценки эффективности предлагаемого метода найдем средний выигрыш. Для этого усредним выигрыши в эффективности в направлениях α_i , соответствующих углам γ , ширина которых меньше или равна ширине ГЛ ДНА (режим ДОЛ может селективировать спектральные составляющие отражений по главному лепестку), то есть усреднение проводим по стробам дальности по селективируемым спектральным компонентам при каждом азимутальном направлении в пределах сектора сканирования. Выигрыш предложенного метода по усредненному критерию (8) оценки эффективности, в сравне-

нии с классическим режимом ДОЛ, составляет 13,67 дБ (23,28 раза) для анализируемой карты местности при заданных параметрах БРЛС.

Выводы: предложен метод формирования радиолокационного портрета подстилающей поверхности, полученного при помощи бортовых радиолокационных систем, работающих в режиме доплеровского облучения луча, в передней полусфере при маловысотном полете, осуществляющий коррекцию искажений, обусловленных отражениями в пределах одной изодопы по боковым лепесткам ДНА, форма которых априорно не известна. Выигрыши по усредненному критерию (8) в сравнении с классическим методом доплеровского облучения луча составляют от 6,21 до 34,20 раз и получены за счет использования радиолокационной информации, поступающей от введенного вспомогательного приемного канала.

Библиографический список

1. Алтатов Б.А., Бабаян П.В. Методы обработки и анализа изображений в бортовых системах обнаружения и сопровождения объектов // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 2. С. 45-51.
2. Аксенов О.Ю. Обнаружение объектов на изображениях при изменяющихся условиях наблюдения // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 2. С. 40-44.
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. С. 31-41.
4. Савостьянов В.Ю. Использование доплеровского обострения луча в режиме обхода препятствий одноканальных РЛС // Радиотехника. 2006. № 11. С. 35 - 39.
5. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. - 368 с.
6. Клочко В.К. Алгоритм формирования трехмерного радиолокационного изображения поверхности // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2006. № 4. С. 68 - 77.