УДК 621.396.96

В.К. ВОЛОСЮК, А.В. ЕРЕМЕЕВ, В.В. ПАВЛИКОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ПЕЛЕНГАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ВЫСОТЫ ЕЁ РЕЛЬЕФА В АМПЛИТУДНОМ СУММАРНО-РАЗНОСТНОМ РАДАРЕ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ

Рассмотрена задача нахождения потенциальной точности пеленгации элементов поверхности для амплитудного суммарно-разностного радара с синтезированной апертурой антенны при картографировании рельефа поверхности. Метод пеленгации элементов поверхности основан на амплитудном моноимпульсном сравнении суммарных и разностных сигналов, снимаемых с выходов антенн, диаграммы направленности которых смещены в угломерной плоскости. В рамках метода максимального правдоподобия синтезирован алгоритм оптимального оценивания точности пеленгации элементов рельефа поверхности. Показано, что амплитудные суммарно-разностные радары с синтезированием апертуры антенны обладают существенно меньшими погрешностями оценок угловых координат разрешаемых элементов рельефа за счет когерентного накопления принятых сигналов.

Ключевые слова: *амплитудный суммарно-разностный РСА, интерферометрические РСА, пеленгация, картографирование рельефа, оптимальная обработка.*

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке и совершенствованию радиолокационных систем картографирования рельефа поверхности с аэрокосмических носителей, отличающихся высокими точностными характеристиками, всепогодностью и возможностью работы в условиях облачности и в ночное время [1-3]. Основу этих систем составляют радиолокационные устройства, выполняющие операции синтезирования апертуры. Суть проблемы состоит в том, что используемые устройства являются сложными, а алгоритмы обработки недостаточно теоретически обоснованны в плане их оптимальности и обеспечения требуемой точности.

В работе [4] предложены, в рамках метода максимального правдоподобия, алгоритмы оптимальной обработки сигналов в РСА с суммарно-разностной пеленгацией элементов рельефа. Однако эти алгоритмы требуют оценок точностных характеристик их работы.

Целью работы является оценка предельных погрешностей пеленгации элементов рельефа в суммарно- разностных РСА с амплитудным сравнением сигналов, характеризующих потенциальные точности восстановления высоты рельефа поверхности.

Постановка задачи

Данная работа является продолжением исследований, представленных в статье [4]. Высота рельефа поверхности определяется по формуле

$$h(y) = H - D_h \cos(\theta_0 + \Delta\theta_h), \qquad (1)$$

где H, D_h и θ_0 - средняя высота, дальность до элемента рельефа поверхности и угол места, соответствующий равносигнальному направлению, полагаются известными. Основным неизвестным параметром является угол $\Delta\theta_h$. Угол $\theta_0 + \Delta\theta_h$ является искомым пеленгом элемента рельефа. Средняя высота H определяется по данным высотомера, а известная дальность D_h задается временем запаздывания зондирующего импульса, $t_з = \frac{2D_h}{c}$. Параметр $\Delta\theta_h$ является существенным. Однако при решении поставленной задачи имеют место два несущественных параметра α_1 и α_2, образующих неизвестный амплитудный множитель $\dot{\alpha} = \alpha_1 + j\alpha_2$.

Эти параметры интереса не представляют, но как неизвестные участвуют в решении системы уравнений наблюдения [4]

$$\begin{gathered} u_1(t) = u_+(t) = \operatorname{Re}\dot{A}_1(\vec{\lambda})\dot{S}_0(t) + n_1(t), \\ u_2(t) = u_-(t) = \operatorname{Re}\dot{A}_2(\vec{\lambda})\dot{S}_0(t) + n_2(t), \\ t \in (0, T), \end{gathered} \qquad (2)$$

содержащей три неизвестных параметра $\vec{\lambda} = \|\alpha_1, \alpha_2, \Delta\theta_h\|$. В этих уравнениях

$$\begin{gathered} \dot{A}_1(\vec{\lambda}) = \dot{A}_+(\vec{\lambda}) = 2G_0\dot{\alpha} = \dot{\alpha}A_{01}, \\ \dot{A}_2(\vec{\lambda}) = \dot{A}_-(\vec{\lambda}) = 2G_0\dot{\alpha}g_0\Delta\theta_h = \dot{\alpha}A_{02}, \end{gathered} \qquad (3)$$

где G_0 - совпадающие по величине вещественные значения диаграммы направленности в равносигнальном направлении, g_0 - крутизна дискриминационной характеристики углового дискриминатора амплитудной суммарно-разностной РЛС.

В сигнале $\dot{s}_k\left(t,\vec{\lambda}\right)=\dot{A}_k\left(\vec{\lambda}\right)\dot{s}_0(t)$, отраженном от элемента поверхности, взаимодействующего с зондирующим импульсом (импульсным объемом), отдельно выделена амплитуда $\dot{A}_k\left(\vec{\lambda}\right)$, зависящая от параметров $\vec{\lambda}$.

Функция правдоподобия для решения задачи оптимальной пеленгации участков поверхности, взаимодействующих с импульсным объемом зондирующего сигнала, была получена в виде

$$P\left(\vec{u}(t)\,|\,\vec{\lambda}\right)=\prod_{k=1}^{2}P\left[\vec{u}_k(t)\,|\,\vec{\lambda}\right]= \\ =k\exp\left\{\sum_{k=1}^{2}\left[\operatorname{Re}\dot{A}_k\left(\vec{\lambda}\right)\dot{Q}_{0k}-\left|\dot{A}_k\left(\vec{\lambda}\right)\right|\mu_{0k}\right]\right\}, \qquad (4)$$

где

$$\dot{Q}_{0k}=\frac{2}{N_0}\int_0^T u_k(t)\dot{s}_0(t)\,dt, \\ \mu_{0k}=\frac{1}{N_0}\int_0^T\left[\operatorname{Re}\dot{s}_0(t)\right]^2 dt. \qquad (5)$$

В результате дифференцирования функции правдоподобия (4) и приравнивания к нулю ее первой производной найден алгоритм оптимального оценивания параметров $\vec{\lambda}$. Оценки параметров $\vec{\lambda}$, соответствующие значениям максимума функции (4), $\hat{\vec{\lambda}}=\vec{\lambda}_m$, находятся из решения системы уравнений

$$\dot{A}_k\left(\hat{\vec{\lambda}}\right)=\frac{\dot{Q}^*_{0k}}{2\mu_{0k}}. \qquad (6)$$

Непосредственно искомый существенный параметр $\Delta\theta_h$ определяется формулой

$$\Delta\hat{\theta}_h=\frac{\dot{A}_-\left(\vec{\lambda}\right)}{g_0\dot{A}_+\left(\vec{\lambda}\right)}=\frac{1}{g_0}\frac{\int_0^T u_-(t)\dot{s}^*_0(t)\,dt}{\int_0^T u_+(t)\dot{s}^*_0(t)\,dt}\approx \\ \approx\frac{1}{g_0}\frac{\int_0^T \dot{U}_-(t)\dot{S}^*_0(t)\,dt}{\int_0^T \dot{U}_+(t)\dot{S}^*_0(t)\,dt}. \qquad (7)$$

где $\dot{U}_k(t)$ и $\dot{S}_{0k}(t)$ - комплексные огибающие процессов $\dot{u}_k(t)$ и $\dot{s}_{0k}(t)$.

Потенциальные точности измерения параметров $\vec{\lambda}=\left\|\alpha_1,\alpha_2,\Delta\theta_h\right\|$ определяются диагональными элементами ковариационной матрицы ошибок, обратной к информационной матрице Фишера, на главной диагонали которой расположены дисперсии предельных погрешностей оценок параметров $\alpha_1,\alpha_2,\Delta\theta_h$, т.е. $\sigma^2_{\lambda_1}=\sigma^2_{\alpha_1}$, $\sigma^2_{\lambda_2}=\sigma^2_{\alpha_2}$, $\sigma^2_{\lambda_3}=\sigma^2_{\Delta\theta_h}$. Это нижние границы значений ошибок, меньше которых эти значения не могут быть получены.

Элементы матрицы Фишера определяются формулой [5]

$$B_{\mu\nu}=-\left\langle\frac{\partial^2}{\partial\lambda_\mu\partial\lambda_\nu}\ln P\left[\vec{u}(t)\,|\,\vec{\lambda}\right]\right\rangle\Bigg|_{\vec{\lambda}=\vec{\lambda}_и}, \qquad (8)$$

где $\vec{\lambda}_и$ - совокупность истинных значений параметров $\vec{\lambda}$, $\langle\cdot\rangle$ - знак статистического усреднения.

При большом отношении сигнал/шум можно воспользоваться параболической аппроксимацией функции правдоподобия в окрестности ее максимального значения, т.е. в окрестности значений параметра $\vec{\lambda}_m$, соответствующих максимуму функции $P\left[\vec{u}(t)\,|\,\vec{\lambda}\right]$. В формуле (8) при этом следует заменить $\vec{\lambda}_и$ на $\vec{\lambda}_m$.

Расчет предельных погрешностей оценок параметра $\lambda_3=\Delta\theta_h$

Здесь интерес представляет лишь один параметр, $\lambda_3=\Delta\theta_h$. Но так как в систему уравнений наблюдения входят еще два неизвестных параметра, то естественно они участвуют в решении этой системы и влияют на точность оценки параметра λ_3.

Найдем вторую производную от логарифма функции правдоподобия в точке $\vec{\lambda}=\vec{\lambda}_m$

$$\frac{\partial^2\ln P\left[\vec{u}(t)\,|\,\vec{\lambda}\right]}{\partial\lambda_\mu\partial\lambda_\nu}\Bigg|_{\vec{\lambda}=\vec{\lambda}_m}= \\ =\frac{\partial^2}{\partial\lambda_\mu\partial\lambda_\nu}\left\{\sum_{k=1}^{2}\left[\operatorname{Re}\dot{A}_k\left(\vec{\lambda}\right)Q_{0k}-\right.\right. \\ \left.\left.-\left|\dot{A}_k\left(\vec{\lambda}\right)\right|\mu_{0k}\right]\right\}\Bigg|_{\vec{\lambda}=\vec{\lambda}_m}= \\ =\frac{\partial}{\partial\lambda_\mu}\left\{\operatorname{Re}\left[\sum_{k=1}^{2}\left[\frac{\partial\dot{A}_k\left(\vec{\lambda}\right)}{\partial\lambda_\nu}Q_{0k}-\right.\right.\right.$$

$$
\left.-2\frac{\partial\dot{A}_k(\vec{\lambda})}{\partial\lambda_\nu}\dot{A}_k^*(\vec{\lambda})\Big]\Big]\Big\}\right|_{\vec{\lambda}=\vec{\lambda}_m}=
$$

$$
=\operatorname{Re}\sum_{k=1}^{2}\left\{\frac{\partial^2\dot{A}_k(\vec{\lambda})}{\partial\lambda_\mu\partial\lambda_\nu}\left[\dot{Q}_{0k}-2\dot{A}_k(\vec{\lambda})\mu_{0k}\right]-\right.
\left.\left.-2\frac{\partial\dot{A}_k(\vec{\lambda})}{\partial\lambda_\mu}\frac{\partial\dot{A}_k^*(\vec{\lambda})}{\partial\lambda_\nu}\mu_{0k}\right\}\right|_{\vec{\lambda}=\vec{\lambda}_m}. \quad (9)
$$

В точке $\vec{\lambda}_m$, где имеет место максимум функции правдоподобия, первое слагаемое равно нулю. Тогда элементы матрицы Фишера (8) будут равны

$$
B_{\mu\nu}=2\operatorname{Re}\sum_{k=1}^{2}\frac{\partial\dot{A}_k(\vec{\lambda})}{\partial\lambda_\mu}\frac{\partial\dot{A}_k^*(\vec{\lambda})}{\partial\lambda_\nu}\mu_{0k}=
=2\sum_{k=1}^{2}\left(\frac{\partial A_{ck}(\vec{\lambda})}{\partial\lambda_\mu}\frac{\partial A_{ck}(\vec{\lambda})}{\partial\lambda_\nu}+\right.
\left.+\frac{\partial A_{sk}(\vec{\lambda})}{\partial\lambda_\mu}\frac{\partial A_{sk}(\vec{\lambda})}{\partial\lambda_\nu}\right)\mu_{0k}, \quad (10)
$$

где A_{ck} и A_{sk} соответственно вещественная и мнимая части комплексной амплитуды $\dot{A}_k$.

Учитывая, что $\frac{\dot{A}_k}{\partial\lambda_2}=j\frac{\dot{A}_k}{\partial\lambda_1}$, запишем информационную матрицу Фишера в развернутом виде

$$
\|B_{\mu\nu}\|=2\mu_0\cdot\begin{Vmatrix}B_{11} & B_{12} & B_{13}\\ B_{21} & B_{22} & B_{23}\\ B_{31} & B_{32} & B_{33}\end{Vmatrix}, \quad (11)
$$

где

$$
\|B_{11}\|=\left|\frac{\partial\dot{A}_1}{\partial\lambda_1}\right|^2+\left|\frac{\partial\dot{A}_2}{\partial\lambda_1}\right|^2;
$$

$$
\|B_{12}\|=0;
$$

$$
\|B_{13}\|=\operatorname{Re}\left(\frac{\partial\dot{A}_1}{\partial\lambda_1}\frac{\partial\dot{A}_1^*}{\partial\lambda_3}+\frac{\partial\dot{A}_2}{\partial\lambda_1}\frac{\partial\dot{A}_2^*}{\partial\lambda_3}\right);
$$

$$
\|B_{21}\|=0;
$$

$$
\|B_{22}\|=\left|\frac{\partial\dot{A}_1}{\partial\lambda_2}\right|^2+\left|\frac{\partial\dot{A}_2}{\partial\lambda_2}\right|^2;
$$

$$
\|B_{23}\|=\operatorname{Re}\left(\frac{\partial\dot{A}_1}{\partial\lambda_2}\frac{\partial\dot{A}_1^*}{\partial\lambda_3}+\frac{\partial\dot{A}_2}{\partial\lambda_2}\frac{\partial\dot{A}_2^*}{\partial\lambda_3}\right);
$$

$$
\|B_{31}\|=\operatorname{Re}\left(\frac{\partial\dot{A}_1}{\partial\lambda_3}\frac{\partial\dot{A}_1^*}{\partial\lambda_1}+\frac{\partial\dot{A}_2}{\partial\lambda_3}\frac{\partial\dot{A}_2^*}{\partial\lambda_1}\right);
$$

$$
\|B_{32}\|=\operatorname{Re}\left(\frac{\partial\dot{A}_1}{\partial\lambda_3}\frac{\partial\dot{A}_1^*}{\partial\lambda_2}+\frac{\partial\dot{A}_2}{\partial\lambda_3}\frac{\partial\dot{A}_2^*}{\partial\lambda_2}\right);
$$

$$
\|B_{33}\|=\left|\frac{\partial\dot{A}_1}{\partial\lambda_3}\right|^2+\left|\frac{\partial\dot{A}_2}{\partial\lambda_3}\right|^2.
$$

Для определения элементов этой матрицы удобно использовать формулы расчета окаймленных матриц

$$
\underline{B}_n=\begin{Vmatrix}\underline{B}_{n-1} & b_{1n}\\ b_{n1} & b_{nn}\end{Vmatrix}=\begin{Vmatrix}\underline{B}_{n-1} & \vec{u}_{n-1}\\ \vec{v}_{n-1}^T & b_{nn}\end{Vmatrix},
$$

где $\underline{B}_n$ и $\underline{B}_{n-1}$ соответственно матрицы размерностью $n\times n$ и $(n-1)\times(n-1)$, $\vec{u}_{n-1}$ и $\vec{v}_{n-1}$ векторы размерностью $(n-1)$.

Для такой матрицы обратную можно найти в виде

$$
\underline{B}_n^{-1}=\begin{Vmatrix}\underline{E}_{n-1} & \vec{R}_{n-1}\\ \vec{L}_{n-1}^T & \frac{1}{a_n}\end{Vmatrix},
$$

где

$$
a_n=b_{nn}-\vec{V}_{n-1}^T\underline{B}_{n-1}^{-1}\vec{u}_{n-1},
$$

$$
\underline{R}_{n-1}=-\frac{\underline{B}_{n-1}^{-1}\vec{u}_{n-1}}{a_n},
$$

$$
\vec{L}_{n-1}^T=-\frac{\vec{V}_{n-1}^T\underline{B}_{n-1}^{-1}}{a_n},
$$

$$
\underline{E}_{n-1}=\underline{B}_n^{-1}-\frac{\underline{B}_{n-1}^{-1}\vec{u}_{n-1}\vec{V}_{n-1}^T\underline{B}_{n-1}^{-1}}{a_n}.
$$

Диагональные элементы ковариационной матрицы, обратной к матрице Фишера, равные дисперсиям предельных погрешностей параметров $\lambda_1+j\lambda_2$, λ_3, имеют вид

$$
\sigma_{\lambda_1}^2=\left[2\mu_0\left(\left|\frac{\partial\dot{A}_1}{\partial\lambda_1}\right|^2+\left|\frac{\partial\dot{A}_2}{\partial\lambda_1}\right|^2\right)\right]^{-1}\times
\times\left\{1+(\Delta)^{-1}\left[\operatorname{Re}\left(\frac{\partial\dot{A}_1}{\partial\lambda_1}\frac{\partial\dot{A}_1^*}{\partial\lambda_3}+\frac{\partial\dot{A}_2}{\partial\lambda_1}\frac{\partial\dot{A}_2^*}{\partial\lambda_3}\right)\right]^2\right\},
$$

$$
\sigma_{\lambda_2}^2=\left[2\mu_0\left(\left|\frac{\partial\dot{A}_1}{\partial\lambda_1}\right|^2+\left|\frac{\partial\dot{A}_2}{\partial\lambda_1}\right|^2\right)\right]^{-1}\times
\times\left\{1+(\Delta)^{-1}\left[\operatorname{Im}\left(\frac{\partial\dot{A}_1}{\partial\lambda_1}\frac{\partial\dot{A}_1^*}{\partial\lambda_3}+\frac{\partial\dot{A}_2}{\partial\lambda_1}\frac{\partial\dot{A}_2^*}{\partial\lambda_3}\right)\right]^2\right\},
$$

$$\sigma^2_{\lambda_3} = \frac{\left(\left| \frac{\partial \dot{A}_1}{\partial \lambda_1} \right|^2 + \left| \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial \lambda_1} \right|^2 \right)}{2\mu_0 \Delta}, \qquad (12)$$

$$\Delta = \left(\left| \frac{\partial \dot{A}_1}{\partial \lambda_3} \right|^2 + \left| \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial \lambda_3} \right|^2 \right) \left(\left| \frac{\partial \dot{A}_1}{\partial \lambda_1} \right|^2 + \left| \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial \lambda_1} \right|^2 \right) -$$

$$- \left| \frac{\partial \dot{A}_1}{\partial \lambda_3} \frac{\partial \dot{A}_1^*}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial \lambda_3} \frac{\partial \dot{A}_2^*}{\partial \lambda_1} \right|^2.$$

В соответствии с (3)

$$\dot{A}_k = \dot{\alpha} A_{0k} \left(\lambda_3 = \Delta\theta_h \right),$$

$$\sigma^2_{\lambda_3} = \sigma^2_{\Delta\theta_h} = \frac{\left(A_{01}^2 + A_{02}^2 \right)}{2\mu_0 \left| \dot{\alpha} \right|^2 \Delta_1},$$

$$\sigma^2_{\alpha_{1(2)}} = \left[2\mu_0 \left(A_{01}^2 + A_{02}^2 \right) \right]^{-1} \times$$

$$\times \left[1 + \alpha^2_{1(2)} \frac{\left(A_{01} \frac{\partial A_{01}}{\partial \lambda_3} + A_{02} \frac{\partial A_{02}}{\partial \lambda_3} \right)}{\left| \dot{\alpha} \right| \Delta_1} \right],$$

$$\sigma^2_{\alpha} = \sigma^2_{\alpha_1} + \sigma^2_{\alpha_2} = \left[2\mu_0 \left(A_{01}^2 + A_{02}^2 \right) \right]^{-1} \times$$

$$\times \left[2 + \frac{\left(A_{01} \frac{\partial A_{01}}{\partial \lambda_3} + A_{02} \frac{\partial A_{02}}{\partial \lambda_3} \right)}{\Delta_1} \right], \qquad (13)$$

$$\Delta_1 = \left(A_{01}^2 + A_{02}^2 \right) \left[\left(\frac{A_{01}}{\partial \lambda_3} \right)^2 + \left(\frac{A_{02}}{\partial \lambda_3} \right)^2 \right] -$$

$$- \left(A_{01} \frac{\partial A_{01}}{\partial \lambda_3} + A_{02} \frac{\partial A_{02}}{\partial \lambda_3} \right)^2.$$

С учетом (3) ($A_{01} = 2\sigma_0$, $A_{02} = 2\sigma_0 g_\theta \Delta\theta_h$) дисперсия ошибки искомого параметра $\Delta\theta_h$ будет равна

$$\sigma^2_{\Delta\theta_h} = \frac{1 + g_\theta^2 \left(\Delta\theta_h \right)^2}{8\mu g_\theta^2}. \qquad (14)$$

Заметим, что здесь полное отношение сигнал/шум по энергии ($\mu = \sigma_0^2 \left| \dot{\alpha} \right|^2 \mu_0$) является безразмерной величиной. Все размерные величины отнесены к сигналу (его энергии) и к спектральной плотности мощности шума, имеющей размерность энергии ($\text{Вт/Гц} = \text{Вт} \cdot \text{с}$).

В этом случае размерность крутизны обратна размерности $\Delta\theta_h$ ($\dim g_\theta = 1/\dim \Delta\theta_h$). При слежении равносигнального направления за направлением на участок взаимодействия импульса с поверхностью величина $\Delta\theta_h$ близка к нулю и вторым слагаемым в (14) можно пренебречь. Тогда

$$\sigma^2_{\Delta\theta_h} = \frac{1}{8\mu g_\theta^2} = \frac{1}{8 g^2_{э\theta}}.$$

Произведение $\sqrt{\mu} g_\theta$ можно рассматривать как крутизну $g_{э\theta}$ некоторого эквивалентного дискриминатора. Эквивалентная крутизна зависит не только от крутизны, как производной разностной ДН, но и от отношения сигнал/шум, что согласуется со статистическим определением [6] дискриминационной характеристики углового дискриминатора и ее крутизны. Рассмотренные системы обладают существенно меньшими погрешностями оценок угловых координат разрешаемых элементов рельефа за счет когерентного накопления принятых сигналов, обеспечивающих повышение энергетического отношения сигнал/шум.

Выводы

Произведен расчет предельных погрешностей оценок пеленгов элементов рельефа для амплитудного суммарно-разностного РСА. В таких радарах, в отличие от классических суммарно-разностных моноимпульсных пеленгаторов, предусмотрен режим когерентного накопления импульсов. Полученные результаты демонстрируют, что амплитудные суммарно-разностные РСА обладают более высокими показателями точности за счет увеличения отношения сигнал/шум при когерентном суммировании принятых сигналов на интервале синтеза апертуры. Потенциальная точность амплитудных суммарно-разностных РСА позволяет сделать вывод о возможности построения на их основе систем картографирования рельефа поверхности.

Литература

1. *Радиолокационные системы космического базирования [Текст] / Ю.С. Лифанов, В.Н. Саблин, А.Н. Федоринов, В.И. Шапошников // Зарубежная радиоэлектроника. – 1998. – №5. – С. 3-14.*
2. *Волосюк, В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации [Текст] / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко. – М.: Физматлит, 2008. – 704 с.*
3. *Кондратенков, Г.С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли [Текст] / Г.С. Кондратенков, А.Ю. Фролов. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.*
4. *Волосюк, В.К. Амплитудная суммарно-разностная обработка сигналов в радарах с синте-*

зированной апертурой антенны при картографировании рельефа поверхности [Текст] / В.К. Волосюк, А.В. Еремеев, В.В. Павликов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – №4(52). – С. 7 – 12.

5. Фалькович, С.Е. Оценка параметров сигнала [Текст] / С.Е. Фалькович. – М.: Сов. радио, 1970. – 335 с.

6. Первачев, С.В. Статистическая динамика радиотехнических следящих систем [Текст] / С.В. Первачев, А.А. Валуев, В.М. Чиликин. – М.: Сов. радио, 1973. – 487 с.

Поступила в редакцию 21.09.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры приема, передачи и обработки сигналов В.В. Лукин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ПОТЕНЦІЙНА ТОЧНІСТЬ ПЕЛЕНГАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ПОВЕРХНІ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ВИСОТИ ЇЇ РЕЛЬЄФУ В АМПЛІТУДНОМУ СУМАРНО-РІЗНИЦЕВОМУ РАДАРІ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

В.К. Волосюк, О.В. Єремєєв, В.В. Павліков

Розглянуто задачу знаходження потенційної точності пеленгації елементів поверхні для амплітудного сумарно-різницевого радара з синтезованою апертурою антени при картографуванні рельєфу поверхні. Метод пеленгації елементів поверхні базується на амплітудному моноімпульсному порівнянні сумарних та різницевих сигналів, що знімаються з виходів антен, діаграми спрямованості яких зміщенні в кутомірній площині. В рамках методу максимальної правдоподібності синтезовано алгоритм оптимального оцінювання точності пеленгації елементів рельєфу поверхні. Показано, що амплітудні сумарно-різницеві радари з синтезуванням апертури антени володіють істотно меншими похибками оцінок кутових координат елементів рельєфу що розділюються за рахунок когерентного накопичення прийнятих сигналів.

Ключові слова: амплітудний сумарно-різницевий РСА, інтерферометричні РСА, пеленгація, картографування рельєфу, оптимальна обробка.

POTENTIAL ACCURACY OF SURFACE ELEMENTS DIRECTION-FINDING FOR THE RELIEF HEIGHT RECOVERY IN THE AMPLITUDE SUM-DIFFERENCE SYNTHETIC APERTURE RADAR

V.K. Volosyuk, A.V. Yeremeyev, V.V. Pavlikov

The problem of finding the potential accuracy of surface elements direction-finding using amplitude sum-difference synthetic aperture radar for mapping surface topography is considered. The method of surface elements direction-finding is based on monopulse amplitude comparison of sum and difference signals, which are outputs of two antennas with directional diagrams shifted in the goniometric plane. The maximum likelihood algorithm for direction-finding estimation of surface relief elements has been synthesized. It is shown that the amplitude sum-difference synthetic aperture radars have a much smaller estimates error w.r.t. angular coordinates for resolved elements of the relief due to the coherent accumulation of the received signals.

Key words: amplitude sum-difference SAR, interferometric SAR, direction-finding, terrain mapping, optimal processing.

Волосюк Валерий Константинович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина, e-mail: valeriy_volosyuk@mail.ru.

Еремеев Александр Викторович – аспирант кафедры проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина, e-mail: a.yeremeev@gmail.com.

Павликов Владимир Владимирович – канд. техн. наук, докторант кафедры проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина, e-mail: pavlikov_kharkov@mail.ru.