

УДК 621.319

СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ В СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ С АНТЕННОЙ РЕШЁТКОЙ ПРИ СИНТЕЗЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ*

В. К. Клочко

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Рязанский государственный радиотехнический университет»,
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
E-mail: KlochkoVK@mail.ru*

Предложен метод сверхразрешения по угловым координатам в системах наблюдения с плоской антенной решёткой при синтезе радиолокационного и радиотеплолокационного изображений земной поверхности с помощью бортовой станции в режиме реального луча, основанный на восстановлении полей отражения и излучения.

Ключевые слова: сверхразрешение, антенная решётка, восстановление радиолокационного и радиотеплолокационного изображения.

Введение. При синтезе изображения земной поверхности с помощью бортовых радиолокационных станций (РЛС) традиционно применяется и развивается режим синтеза апертуры антенны, позволяющий получать изображение с разрешением, близким к оптическому [1]. Однако такой режим накладывает жёсткое ограничение на стабильность полёта носителя РЛС и по этой причине трудно реализуем при манёвренном маловысотном полёте, а также неприменим для радиотеплолокационных станций (РТЛС). Поэтому при маловысотном полёте носителей РЛС и РТЛС перспективным является режим реального луча (РЛ) с использованием антенных решёток (АР) [2–4], формирующих узкий луч диаграммы направленности (ДН) 1–2° и обладающих возможностью электронного сканирования луча в зоне обзора РЛС.

Антенные решётки обычно применяются в системах обнаружения и оценивания координат воздушных объектов и системах обнаружения высотных препятствий при маловысотном полёте [3]. Однако для получения радиолокационного изображения (РЛИ) или радиотеплолокационного изображения (РТЛИ) земной поверхности (и малоразмерных объектов на поверхности) углового разрешения в 1–2° недостаточно. В связи с этим актуальны исследования возможностей сверхразрешения АР в режиме РЛ при синтезе изображения земной поверхности бортовой РЛС или РТЛС.

Цель данной работы — создание метода сверхразрешения по угловым координатам в бортовых системах наблюдения за земной поверхностью с использованием антенной решётки при формировании РЛИ и РТЛИ на основе восстановления полей отражения и излучения.

Под сверхразрешением здесь понимается повышение угловой разрешающей способности системы наблюдения в несколько раз без привлечения аппаратных средств за счёт дополнительной алгоритмической обработки сигналов, принимаемых антенной.

Постановка задачи. Диаграмма направленности плоской АР может быть описана следующими выражениями [2]:

$$\dot{G}(\theta, \varphi) = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \dot{\omega}_{q,k} \exp\{i(\psi_{1q}(\theta, \varphi) + \psi_{2k}(\theta, \varphi))\}, \quad (1)$$

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК № 16.740.11.0519).

$$\begin{aligned}\psi_{1q}(\theta, \varphi) &= 2\pi(q-1)(d_1/\lambda) \sin \theta \cdot \cos \varphi; \\ \psi_{2k}(\theta, \varphi) &= 2\pi(k-1)(d_2/\lambda) \sin \theta \cdot \sin \varphi,\end{aligned}\tag{2}$$

где $\dot{G}(\theta, \varphi)$ — нормированная комплексная ДН, амплитуда $|\dot{G}(\theta, \varphi)|$ которой характеризует коэффициент усиления АР в направлении углов места θ и азимута φ , отсчитываемых от вертикали к плоскости антенны; q и k — номера строки и столбца соответственно, на пересечении которых находится центр q, k -го канала, объединяющего в себе несколько элементов АР; QK — общее число каналов; d_1 и d_2 — расстояния между центрами соседних каналов (между строками и столбцами); λ — длина волны; i — мнимая единица; $\psi_{1q}(\theta, \varphi)$ и $\psi_{2k}(\theta, \varphi)$ — фазы, обусловленные запаздыванием при приёме сигнала с направления (θ, φ) в q -й строке и k -м столбце АР; $\dot{\omega}_{q,k}$ — комплексные весовые коэффициенты, с помощью которых выбирается форма ДН или меняется положение луча в пространстве.

При приёме сигнала справедлива следующая модель измерения в q, k -х приёмных каналах АР:

$$\dot{y}_{q,k}(t, \theta, \varphi) = \gamma u(t, \theta, \varphi) \exp\{i[\psi_{1q}(\theta, \varphi) + \psi_{2k}(\theta, \varphi) + \eta]\} + \dot{\xi}_{q,k}, \quad q = \overline{1, Q}, \quad k = \overline{1, K}, \tag{3}$$

где $\dot{y}_{q,k}(t, \theta, \varphi)$ — комплексный сигнал, принимаемый с углового направления (θ, φ) по ширине ДН в q, k -м канале в момент времени t ; γ — средний (по ширине ДН) коэффициент усиления АР; $u(t, \theta, \varphi)$ — амплитуда сигнала, характеризующая отражающую в РЛС или излучающую в РТЛС способность участка земной поверхности, накрываемого ДН; η — случайная величина, равномерно распределённая на $[0, 2\pi]$, обусловленная неопределённостью отражения в элементах разрешения дальности в РЛС; $\dot{\xi}_{q,k}$ — комплексный белый шум с нулевым средним и дисперсией σ_{ξ}^2 .

Оценку $\hat{u}(t, \theta, \varphi)$ амплитуды $u(t, \theta, \varphi)$ АР обычно находят как линейную операцию взвешивания измерений с весовыми коэффициентами

$$\dot{x}(t, \theta, \varphi) = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \dot{\omega}_{q,k} \dot{y}_{q,k}(t, \theta, \varphi); \quad \hat{u}(t, \theta, \varphi) = |\dot{x}(t, \theta, \varphi)|, \tag{4}$$

а расчёт весовых коэффициентов $\dot{\omega}_{q,k}$ при приёме сигнала подчиняют тем или иным критериям оптимальности [2] (исходя из цели обработки): максимума функции правдоподобия, минимума дисперсии шума, максимума отношения сигнал/шум [сигнал — (помеха + шум)], минимума среднеквадратичного отклонения (СКО) ошибки и др.

Известны оценки потенциальной разрешающей способности АР при измерении координат воздушных целей в режиме РЛ методом максимального правдоподобия на основе информационной матрицы Фишера [5], а также методы оценивания углового положения источников сигналов [6].

Однако при синтезе изображения земной поверхности, представленной множеством точечных отражателей, требуется не оценка координат обнаруживаемых объектов, а оценка амплитуд всех элементов принимаемого АР поля отражения (в РЛС) или излучения (в РТЛС). Поле характеризует отражающую или излучающую способность элементов поверхности, накрываемой ДН, а совокупность амплитуд элементов поля образует изображение поверхности по ширине ДН.

Задача сверхразрешения заключается в восстановлении $(M \times N)$ -матрицы изображения участка поверхности, накрываемого ДН антенны, по совокупности QK измерений (3),

полученных в каналах $(Q \times K)$ -решётки, в виде оценок амплитуд $u(t, \theta_m, \varphi_n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, — составляющих суммарной амплитуды $u(t, \theta, \varphi)$ в (3). Размер матрицы задаётся числом элементов дискретизации по углу места M и азимуту N в пределах ширины ДН, а сами числа M и N определяются исходя из точности оценивания амплитуд. Подобные задачи известны в теории восстановления (реконструкции, синтеза) изображений (например, [7]) и решаются разными методами в зависимости от модели восстанавливаемого изображения в пространственной или частотной областях. Далее представлено решение задачи восстановления поля в пространственной области применительно к задаче сверхразрешения в АР.

Решение задачи сверхразрешения методом восстановления полей. Модель измерения в q, k -х каналах АР при восстановлении амплитуд $u(t, \theta_m, \varphi_n)$ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{y}_{q,k}(t, \theta, \varphi) = & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \dot{G}(\theta_m, \varphi_n) u(t, \theta_m, \varphi_n) \exp\{i[\psi_{1q}(\theta_m, \varphi_n) + \\ & + \psi_{2k}(\theta_m, \varphi_n) + \eta]\} + \dot{\xi}_{q,k}, \quad q = \overline{1, Q}, \quad k = \overline{1, K}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь

$$\psi_{1q}(\theta_m, \varphi_n) = 2\pi(q-1)(d_1/\lambda) \sin \theta_m \cdot \cos \varphi_n;$$

$$\psi_{2k}(\theta_m, \varphi_n) = 2\pi(k-1)(d_2/\lambda) \sin \theta_m \cdot \sin \varphi_n;$$

$$\theta_m = \theta + (m-1/2)h_1; \quad \varphi_n = \varphi + (n-1/2)h_2; \quad h_1 = \Delta\theta/M; \quad h_2 = \Delta\varphi/N,$$

где суммирование осуществляется по MN элементам дискретизации угла места и азимута по ширине ДН; $\dot{G}(\theta_m, \varphi_n)$ — нормированный коэффициент усиления в m, n -м элементе дискретизации ДН, полученный в соответствии с (1); $u(\theta_m, \varphi_n)$ — амплитуда, характеризующая отражающую или излучающую способность m, n -го элемента поверхности с угловыми координатами (θ_m, φ_n) ; $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$ — ширина ДН по углу места и азимуту соответственно; h_1 и h_2 — шаг дискретизации по θ и φ .

Обозначим

$$\dot{x}(t, \theta_m, \varphi_n) = u(t, \theta_m, \varphi_n) \exp(i\eta)$$

— комплексный m, n -й элемент поля отражения в РЛС или излучения в РТЛС;

$$\dot{\alpha}_{q,k}(\theta_m, \varphi_n) = \dot{G}(\theta_m, \varphi_n) \exp\{i[\psi_{1q}(\theta_m, \varphi_n) + \psi_{2k}(\theta_m, \varphi_n)]\} \quad (6)$$

— характеристика ДН q, k -го канала в дискретных точках угла места θ_m и азимута φ_n . При этом модель измерения (5) принимает вид

$$\dot{y}_{q,k}(t, \theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \dot{\alpha}_{q,k}(\theta_m, \varphi_n) \dot{x}(t, \theta_m, \varphi_n) + \dot{\xi}_{q,k}, \quad q = \overline{1, Q}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (7)$$

Задача сверхразрешения по угловым координатам с позиции модели (7) заключается в наилучшем оценивании элементов поля $\dot{x}(t, \theta_m, \varphi_n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, т. е. решении системы QK уравнений (7) относительно MN неизвестных $\dot{x}(t, \theta_m, \varphi_n)$ в сечениях дальности (времени t).

Систему (7) удобно представить в векторно-матричной форме [7, 8]:

$$Y = AX + V, \quad (8)$$

где Y — вектор-столбец QK измерений $\dot{y}_{q,k}(t, \theta, \varphi)$, которые записаны построчно в сквозном порядке; A — $(QK \times MN)$ -матрица значений $\dot{\alpha}_{q,k}(\theta_m, \varphi_n)$, расположенных по определённому правилу; X — вектор-столбец MN параметров поля отражения или излучения $\dot{x}(t, \theta_m, \varphi_n)$; V — вектор-столбец QK помех $\dot{\xi}_{q,k}$.

Решение (8) осуществляется по критерию минимума евклидовой нормы $\|Y - AX\|$ методом псевдообратной матрицы A^+ , при этом оптимальная оценка \hat{X} вектора X находится как линейная операция вида

$$\hat{X} = A^+Y, \quad (9)$$

где прямоугольная $(MN \times QK)$ -матрица A^+ вычисляется заранее или методом сингулярного разложения матрицы A [9], или методом регуляризации по Тихонову [10], например: $A^+ = (A^H A + \delta I)^{-1} A^H$, где δ — параметр регуляризации, I — единичная матрица, H — символ комплексного сопряжения и транспонирования.

После выполнения операций (9) элементы MN -вектора оценок \hat{X} переписываются построчно в $(M \times N)$ -матрицу с элементами $\hat{x}(t, \theta_m, \varphi_n)$, модули $|\hat{x}(t, \theta_m, \varphi_n)| = u(\theta_m, \varphi_n)$ которых представляют амплитудное изображение $u(t, \theta_m, \varphi_n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, участка земной поверхности, наблюдаемого в пределах зоны $\Delta\theta \times \Delta\varphi$ видимости ДН АР в моменты времени t (в элементах разрешения дальности в РЛС). Применительно к РТЛС получается изображение $u(\theta_m, \varphi_n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, усреднённое по времени наблюдения t .

В развёрнутом виде операции (9) представляют собой весовую обработку измерений:

$$\hat{x}(t, \theta_m, \varphi_n) = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \dot{w}_{q,k}(m, n) \dot{y}_{q,k}(t, \theta, \varphi), \quad m = \overline{1, M}, \quad n = \overline{1, N}, \quad (10)$$

и отличаются от (4) увеличенным объёмом весовых коэффициентов, рассчитанных для m, n -х элементов дискретизации угла места и азимута.

Точность оценивания (восстановления поля) характеризуется ковариационной матрицей $K_{\Delta X}$ ошибок оценивания $\Delta = \hat{X} - X$, которую при малых значениях δ приближённо можно записать как [8]

$$K_{\Delta X} = 2\sigma_{\xi}^2 (A^H A + \delta I)^{-1}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что точность восстановления определяется структурой матрицы A , зависящей, как видно из (5) и (6), от ДН антенны $\dot{G}(\theta, \varphi)$, числа каналов Q и K , расстояний между центрами каналов d_1, d_2 , а также размера шага дискретизации по углу места $h_1 = \Delta\theta/M$ и азимуту $h_2 = \Delta\varphi/N$. С увеличением M, N и соответственно с уменьшением h_1, h_2 проявляется линейная зависимость строк матрицы A , и она становится плохо обусловленной, что не даёт возможности с требуемой точностью решить систему уравнений (8). Таким образом, можно говорить об ограничении метода восстановления: чем меньше ширина $\Delta\theta, \Delta\varphi$ ДН АР, тем меньше числа M, N и тем в меньшей степени проявляется эффект сверхразрешения. В этом случае следует увеличивать число каналов Q, K и расстояния между центрами каналов d_1, d_2 .

Более удобной для вычислений является модель измерений, в которой удаётся аппроксимировать ДН $\dot{G}(\theta, \varphi)$ функцией, разделяющейся по переменным θ и φ : $\dot{G}(\theta, \varphi) = \dot{g}_1(\theta)\dot{g}_2(\varphi)$. Тогда коэффициенты (6) также разделяются по переменным θ_m и φ_n :

$$\dot{\alpha}_{q,k}(\theta_m, \varphi_n) = \dot{\alpha}_q(\theta_m)\dot{\beta}_k(\varphi_n),$$

и (7) принимает вид

$$\dot{y}_{q,k}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \dot{\alpha}_q(\theta_m) \sum_{n=1}^N \dot{x}(\theta_m, \varphi_n)\dot{\beta}_k(\varphi_n) + \dot{\xi}_{q,k},$$

или в матричной форме [8]

$$Y = AXB + V, \quad (12)$$

где Y — $(Q \times K)$ -матрица измерений $\dot{y}_{q,k}(\theta, \varphi)$, $q = \overline{1, Q}$, $k = \overline{1, K}$; A — $(Q \times M)$ -матрица коэффициентов $\dot{\alpha}_q(\theta_m)$, $q = \overline{1, Q}$, $m = \overline{1, M}$; X — $(M \times N)$ -матрица искомого элемента поля (искомое изображение наблюдаемого участка поверхности); B — $(N \times K)$ -матрица коэффициентов $\dot{\beta}_k(\varphi_n)$, $n = \overline{1, N}$, $k = \overline{1, K}$, записанная в транспонированном виде по отношению к матрице A ; V — $(Q \times K)$ -матрица помех $\dot{\xi}_{q,k}$, $q = \overline{1, Q}$, $k = \overline{1, K}$.

Оптимальная оценка \hat{X} матрицы X находится с помощью критерия минимума следа матрицы $(Y - AXB)^H(Y - AXB)$ по формуле [8]

$$\hat{X} = (A^H A + \delta I)^{-1} A^H Y B^H (B B^H + \delta I)^{-1} \quad (13)$$

или в виде двухэтапной процедуры

$$\hat{Z} = W_A Y \Rightarrow \hat{Z}^H; \quad (14)$$

$$\hat{X}^H = W_B^H \hat{Z}^H \Rightarrow \hat{X} = (\hat{X}^H)^H,$$

где $W_A = (A^H A + \delta I)^{-1} A^H$, $W_B = B^H (B B^H + \delta I)^{-1}$ — матрицы комплексных весовых коэффициентов \dot{w} .

Модули $|\dot{x}(\theta_m, \varphi_n)|$ элементов комплексной матрицы оценок \hat{X} по совокупности m, n дают изображение участка поверхности.

Оценки (13), подобно (10), могут быть представлены в виде линейной комбинации измерений.

Результаты моделирования. Моделировалась линейная АР (по одной q -й координате), для которой в соответствии с (1) для $\omega_q \equiv 1$ рассчитывалась амплитудная ДН $|G(\theta)|$ при $\varphi = 0$ и направлении визирования $\theta = 45^\circ$. Измерения моделировались в соответствии с (3), где искомого амплитудное изображение $u(\theta_m)$, $m = \overline{1, M}$, задавалось чередованием нулей и импульсов с амплитудой $U = 10$. Точность оценивания $u(\theta_m)$ на множестве реализаций случайной величины $\dot{\xi}_q$ определялась по СКО $\sigma_{\Delta U}$ ошибки восстановления $\Delta U = \hat{u}(\theta_m) - u(\theta_m)$ и считалась удовлетворительной для повышения разрешения по углу θ в M раз при $\sigma_{\Delta U} \approx 0,1$. Результаты моделирования представлены в табл. 1–3.

В табл. 1 для различного числа каналов Q отношения $d_1/\lambda = 2$ и СКО помехи $\sigma_\xi = 0,1$ показана эффективная ширина ДН $\Delta\theta$ (на уровне 0,5 мощности), соответствующая (1), и сверхразрешение $\Delta\theta^* = \Delta\theta/M$ (в градусах) при восстановлении элементов поля алгоритмом (9). Видно, что метод позволяет повысить разрешающую способность по одному углу в 3 раза.

Таблица 1

Q	$\Delta\theta$, град	$\Delta\theta^*$, град
20	3,0	1
30	2,5	0,8
40	2,0	0,6

Таблица 2

σ_ξ	$\sigma_{\Delta U}$
0,1	0,13
0,3	0,39
0,5	0,65

Таблица 3

d_1/λ	$\Delta\theta^*$, град
10	0,20
15	0,12
20	0,09

При увеличении числа M , т. е. при попытке уменьшить $\Delta\theta^*$, возрастает СКО ошибки восстановления ($\sigma_{\Delta U} > 0,1$), изображение поля размывается и разрешающая способность (как способность различения двух близко расположенных объектов) ухудшается. В табл. 2 показано, как с увеличением СКО помехи σ_ξ возрастает СКО ошибки восстановления $\sigma_{\Delta U}$.

С увеличением числа Q элементов в каждом канале АР в 5–10 раз (что равносильно увеличению расстояния между центрами каналов d_1 в такое же число раз) ширина $\Delta\theta^*$ синтезированного элемента разрешения уменьшается, как показано в табл. 3. Однако при этом уменьшается ширина самой ДН АР, т. е. эффект сверхразрешения (примерно в 3 раза) сохраняется.

Заключение. В данной работе предложен метод сверхразрешения в системах наблюдения с антенной решёткой на основе решения задачи восстановления изображения. Метод имеет определённые ограничения, связанные с шириной ДН и параметрами АР, и может найти применение при маловысотных полётах, где небольшой эффект углового сверхразрешения даёт удовлетворительное линейное разрешение на малой дальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю.** Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: Учеб. пособие для вузов /Под ред. Г. С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
2. **Монзинго Р. А., Миллер Т. У.** Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
3. **Активные** фазированные антенные решетки /Под ред. Д. И. Воскресенского, А. И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004. 487 с.
4. **Башлы П. Н., Кузнецов Ю. А.** Модифицированный метод квазиоптимального управления антенными решётками информационных систем // Автометрия. 2011. **47**, № 1. С. 67–73.
5. **Проскурин В. И.** Потенциальная разрешающая способность радиолокационной станции // Радиотехника. 2001. № 5. С. 67–70.
6. **Шевченко В. Н.** Оценивание углового положения источников когерентных сигналов на основе методов регуляризации // Радиотехника. 2003. № 9. С. 3–10.
7. **Василенко Г. И., Тараторин А. М.** Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
8. **Ключко В. К.** Методы формирования трехмерных изображений поверхности в бортовых системах радиовидения // Автометрия. 2009. **45**, № 1. С. 23–33.
9. **Прэтт У.** Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. Кн. 1. 310 с.
10. **Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.** Методы решения некорректных задач: Учеб. пособие. М.: Наука, 1986. 288 с.

Поступила в редакцию 21 апреля 2011 г.