УДК 621.396.96

Н. П. Матвеев

МОДЕЛЬ МОНОИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ С ДИСКРЕТНЫМ ФАЗИРОВАНИЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Разработана математическая модель для оценки точности измерения угловых координат объекта фазовой суммарно-разностной моноимпульсной системой, выполненной на основе двумерной эквидистантной фазированной антенной решетки с дискретным фазированием. Определены методические угловые ошибки из-за дискретизации фазового фронта в апертуре фазированной антенной решетки в фазовом пространстве измерений для типовой модели. Приведены результаты численного моделирования. Предложен алгоритм оценки угловых координат адекватный уточненной модели измерений.

Жесткие требования к многофункциональным РЛС по оперативной и точной перестройке параметров устройств для реализации многочисленных режимов функционирования приводят к необходимости применения быстродействующих управляющих и вычислительных устройств [1]. В РЛС с управляемыми диаграммами направленности (ДН) фазы в каналах излучателей антенных решеток регулируются с помощью дискретных фазовращателей. Дискретность регулировки фазы оказывает существенное влияние на ДН, скорость сканирования, число одновременно сопровождаемых и точность определения угловых координат лоцируемых объектов. Характер влияния дискретизации фазы в каналах фазированной антенной решетки (ФАР) РЛС на перечисленные характеристики РЛС различен [2]. Математические модели для расчета характеристик подсистем РЛС, учитывающие параметры дискретных схем, позволяют проанализировать эффективность принятых технических решений с точки зрения их влияния на конечные характеристики станции и получить количественные оценки на основе результатов численного моделирования.

Применение дискретных схем формирования фазового фронта в апертуре ФАР с фазовой суммарно-разностной моноимпульсной системы приводит к появлению дополнительных ошибок углометрии.

Методы повышения точности измерений и оценивания. Для повышения точности измерения пеленгатора с дискретным фазированием используются различные способы [2–4], основанные на:

— методах статистического усреднения по временной или/и пространственной координате ошибок системы измерения;

— анализе механизмов возникновения ошибок измерения и уточнении математической модели измерения, реализующей понятие условного истинного значения [5] .

Эти направления и определяют два основных подхода к решению задачи.

Первый подход основан на изучении статистических свойств ошибок для их дальнейшей минимизации посредством аппаратурных и алгоритмических решений. При этом решения могут обеспечивать минимизацию фазовых ошибок дискретизации (уменьшения фазового дискрета, применения статистического алгоритма фазирования, введения детерминированного нелинейного начального фазового распределения, апертурных алгоритмов вычисления фазового распределения [2, 3]) и минимизацию систематической и случайных составляющих ошибок измерения угловых координат объекта. Систематические ошибки компенсируются алгоритмами юстировки, случайные составляющие — статистическим усреднением угловых ошибок измерения. Для этого требуется накопление достаточной статистики и проведение юстировочных работ, основанных на сравнении истинного значения с измеренным, в полном функциональном пространстве системы измерения. Истинное значение определяется эталонным объектом с заранее известными угловыми координатами.

К недостаткам такого подхода следует отнести значительные временные и материальные затраты, а также ограниченность области функционального пространства, в которой проводятся эксперименты для обучения алгоритмов, что зачастую приводит к их неэффективности вне зоны обучения.

В основе второго подхода лежит изучение физической природы угловых ошибок измерения, концентрированным итогом которого является математическая модель.

Представленная математическая модель фазовой суммарно-разностной моноимпульсной системы на основе двумерной эквидистантной ФАР с дискретным фазированием описывает точностные характеристики пеленгатора. Такие модели служат для анализа эффективности принятых технических решений, позволяют получить выражения для оценки угловых ошибок, могут быть использованы в моделирующих алгоритмах и при высокоточных измерениях для корректировки результатов замеров.

Особенности системы измерения. Предлагаемая математическая модель описывает моноимпульсную систему фазового типа на основе двумерной эквидистантной ФАР с амплитудным распределением произвольного вида, суммарно-разностной обработкой сигналов, когда фазовый фронт создается с помощью дискретных фазовращателей–фазопереключателей с дискретом $\Delta\varphi$.

Амплитудное распределение произвольного вида $A_{xz} \neq A_x A_z$ задается таблицей значений по номерам излучателей: z — номер столбца строчно-столбцовой матрицы, $z = -\overline{Z;Z}$, $z \neq 0$; x — номер строки строчно-столбцовой матрицы, $x = -\overline{X_z;X_z}$, $x \neq 0$. Зависимость $X_z = f(z)$ представляется табличной функцией.

Фазовому суммарно-разностному пеленгатору на основе ФАР с амплитудным распределением произвольного вида присуще смещение фазовых центров подрешеток, зависящее от координат цели $(\beta_{\text{ц}}, \varepsilon_{\text{ц}})$ и заданного направления выставления луча $(\beta_{\text{з}}, \varepsilon_{\text{з}})$. В результате возникают дополнительные ошибки измерения угловых координат из-за априорной неопределенности положения цели и использования в алгоритме измерения постоянного значения базы. Оценка точности угловых измерений при дискретизации фазового фронта предполагает знание истинного значения базы b, которая для рассматриваемой моноимпульсной системы является сложной функцией измеряемых угловых координат цели и направления выставления луча.

Фазовая ошибка дискретизации. Фаза поля от xz-го излучателя в дальней зоне при дискретном фазировании будет отличаться от идеализированного варианта $\alpha_{xz} = \psi_{xz} - k\Delta r_{xz}$:

$$\alpha_{\delta xz} = \psi_{\delta xz} - k\Delta r_{xz},$$

где $\psi_{xz} = mx_\delta + nz_\delta$ — линейное фазовое распределение по номерам излучателей; $m = \dfrac{2\pi}{\lambda}\sin\varepsilon_{\text{з}}$; $n = \dfrac{2\pi}{\lambda}\sin\beta_{\text{з}}$; $x_\delta = d\overline{x}$ и, $z_\delta = d\overline{z}$ — дискретные координаты излучателей полотна ФАР; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; Δr_{xz} — разность хода лучей для xz-го излучателя относительно центра полотна ФАР; $\psi_{\delta xz} = \Delta\varphi\mathbf{[}\dfrac{\psi_{xz}}{\Delta\varphi} + 0{,}5\mathbf{]}$ — устанавливаемая фаза тока в xz-м элементе при дискретном способе задания; **[ ]** — операция округления до целого с недостатком.

Введем следующие понятия: непрерывные оси полотна ФАР $\tilde{x}, \tilde{z}$; гладкая фаза на непрерывной оси

$$\tilde{\psi}_{xz} = \tilde{\psi}_x + \tilde{\psi}_z, \quad \tilde{\psi}_x = m\tilde{x}, \quad \tilde{\psi}_z = n\tilde{z};$$

дискретная фаза на непрерывной оси $\tilde{\psi}_{\delta xz} = \Delta\varphi\mathbf{[}\dfrac{\tilde{\psi}_{xz}}{\Delta\varphi} + 0{,}5\mathbf{]}$; координаты переброса фазы на непрерывной оси $\tilde{x}_k$, $\tilde{z}_k$; номер дискрета фазы — $k = \mathbf{[}\dfrac{m\tilde{x}}{\Delta\varphi} + \dfrac{n\tilde{z}}{\Delta\varphi} + 0{,}5\mathbf{]}$, $k = \left(\overline{-k_{\max}, k_{\max}}\right)$, где $k_{\max} = \left[\dfrac{m\tilde{x}_{\max}}{\Delta\varphi} + \right.$ $\left. + \dfrac{n\tilde{z}_{\max}}{\Delta\varphi} + 0{,}5\right]$.

Фазовая ошибка (рис. 1)

$$\Delta\tilde{\psi}_{xz} = \tilde{\psi}_{xz} - \tilde{\psi}_\delta = m\tilde{x} + n\tilde{z} - \Delta\varphi\left[\frac{m\tilde{x}}{\Delta\varphi} + \frac{n\tilde{z}}{\Delta\varphi} + 0{,}5\right] \tag{1}$$

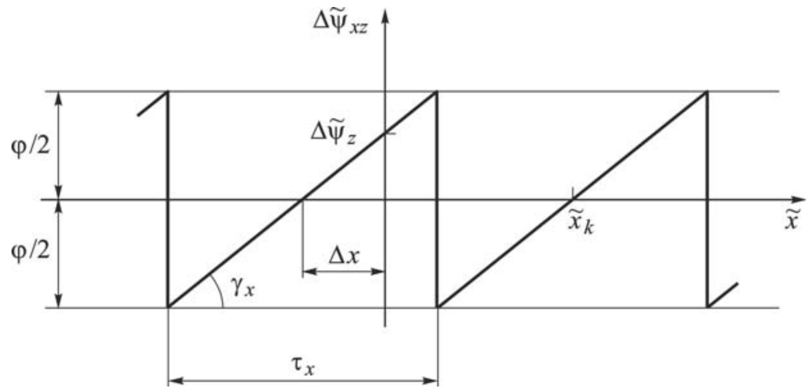


Рис. 1. Функция фазовой ошибки $\Delta\tilde{\psi}_{xz}$ в сечении $\tilde{z}$

лежит в пределах $\overline{(-\Delta\varphi/2, \quad \Delta\varphi/2)}$ и представляет собой в сечениях $\tilde{z} =$ const пилообразную периодическую функцию с одинаковыми по осям, параллельным оси $\tilde{x}$, периодами τ_x. По осям, параллельным оси $\tilde{z}$ (в сечениях $\tilde{x} =$ const), период функции фазовой ошибки — τ_z. Угол наклона к оси $\tilde{x}$ пилообразного участка γ_x в сечениях $\tilde{z} =$ const соответствует углу наклона функции $\tilde{\psi}_x$. Поэтому $\operatorname{tg}(\gamma_x) = m$.

Соответственно угол наклона к оси $\tilde{z}$ пилообразного участка γ_z в сечениях $\tilde{x} =$ const равен углу между функцией $\tilde{\psi}_z$ и осью $\tilde{z} - \operatorname{tg}\gamma_z = n$.

Следовательно, период функции $\Delta\tilde{\psi}_{xz}$ по оси $\tilde{x}$ составляет $\tau_x = \dfrac{\Delta\varphi}{m}$, по оси $\tilde{z} - \tau_z = \dfrac{\Delta\varphi}{n}$.

Отличие одноименных сечений $\Delta\tilde{\psi}_{xz}$ друг от друга состоит в привязке пилообразной функции к началу координат сечения. Легко определить смещения Δx, Δz пилообразной функции относительно нуля в сечениях

$$\tilde{z} = \text{ const } - \ \Delta x = \frac{\Delta\tilde{\psi}_z}{m};$$

$$\tilde{x} = \text{ const } - \ \Delta z = \frac{\Delta\tilde{\psi}_x}{n},$$

где $\Delta\tilde{\psi}_z = \Delta\tilde{\psi}_{xz(x=0)} = n\tilde{z} - \Delta\varphi\left[\dfrac{n\tilde{z}}{\Delta\varphi} + 0{,}5\right]$, $\Delta\tilde{\psi}_x = \Delta\tilde{\psi}_{xz(z=0)} = m\tilde{x} - \Delta\varphi\left[\dfrac{m\tilde{x}}{\Delta\varphi} + 0{,}5\right]$.

Ошибку дискретизации фазового фронта в апертуре ФАР (1) можно выразить через периоды τ_x и τ_z:

$$\Delta\tilde{\psi}_{xz} = \frac{\tilde{x}}{\tau_x} + \frac{\tilde{z}}{\tau_z} + 0{,}5m\tilde{x} + n\tilde{z} - \Delta\varphi. \qquad (2)$$

Период τ_x обратно пропорционален синусу заданного угла $\varepsilon_з$, а период $\tau_{\tilde{z}}$ — синусу $\beta_з$, поэтому $\beta_з$ и $\varepsilon_з$ изменяют длительность ступенек $\Delta\tilde{\psi}_{xz}$ по координатам $\tilde{x}$, $\tilde{z}$ и, как следствие, крутизну наклона пилообразных участков.

Формулы вычисления фазовой ошибки дискретизации для дискретного поля ФАР преобразуются из выражения (2) путем замены $\tilde{x}$ на x_δ и $\tilde{z}$ на z_δ:

$$\Delta\psi_{xz} = mx_\delta + nz_\delta - \Delta\varphi[\frac{x_\delta}{\tau_x} + \frac{z_\delta}{\tau_z} + 0{,}5]. \tag{3}$$

Таким образом, фазовая ошибка дискретизации $\Delta\psi_{xz}$ является функцией номера строки x, номера столбца z, заданного направления выставления максимума ДН — $\beta_з$, $\varepsilon_з$, а также рабочей длины волны (параметры: $\Delta\varphi$ — фазовый дискрет, шаг расстановки излучателей — d, считаются константами), т.е.

$$\Delta\psi_{xz} = f\left(\beta_з, \varepsilon_з, x, z, \lambda\right). \tag{4}$$

Оценка угловых характеристик. Исходя из вида функции $\Delta\psi_{xz}$, делаем заключение о нечетности функции ошибок относительно дискретных координат $\bar{x}$ и $\bar{z}$: $\Delta\psi_{xz} = -\Delta\psi_{-x,-z}$; $\Delta\psi_{x,-z} = -\Delta\psi_{-x,z}$. Так как

$$\psi_{\delta xz} = \psi_{xz} - \Delta\psi_{xz}$$

и

$$\alpha_{\delta xz} = \alpha_{xz} - \Delta\psi_{xz},$$

поэтому и при дискретизации фазы имеют место соотношения:

$$\psi_{\delta x,z} = -\psi_{\delta -x,-z}; \quad \psi_{\delta x,-z} = -\psi_{\delta -x,z};$$

$$\alpha_{\delta x,z} = -\alpha_{\delta -x,-z}; \quad \alpha_{\delta x,-z} = -\alpha_{\delta -x,z}; \quad \alpha_{\delta -x,z} = -\alpha_{\delta x,-z}.$$

Следовательно, выражения для множителей решеток ДН суммарного и разностных каналов фазового пеленгатора с суммарно-разностной обработкой сигналов могут быть получены заменой α_{xz} на $\alpha_{\delta xz}$:

$$f_{\Sigma\delta} = \frac{2}{E_{\max}} \sum_{z=1}^{Z} \sum_{x=1}^{X_z} A_{xz}\left(\cos\alpha_{\delta\, x,z} + \cos\alpha_{\delta\, -x,z}\right); \tag{5}$$

$$f_{\beta\delta} = \frac{2j}{E_{\max}} \sum_{z=1}^{Z} \sum_{x=1}^{X_z} A_{xz}(\sin\alpha_{\delta\, -x,z} + \sin\alpha_{\delta\, x,z}); \tag{6}$$

$$f_{\varepsilon\delta} = \frac{2j}{E_{\max}} \sum_{z=1}^{Z} \sum_{x=1}^{X_z} A_{xz}(\sin\alpha_{\delta\, x,z} - \sin\alpha_{\delta\, -x,z}). \tag{7}$$

Дискретная фаза в xz-м излучателе отличается от гладкой:

$$\alpha_{\delta\, x,z} = \alpha_{xz} - \Delta\psi_{xz} = a_z + b_x - \Delta\psi_{x,z};$$

$$\alpha_{\delta\,-x,z} = \alpha_{-x,z} - \Delta\psi_{-x,z} = a_z - b_x - \Delta\psi_{-x,z}.$$

Если введем обозначения

$$a_{\delta\,z,x} = a_z - \frac{\Delta\psi_{x,z} + \Delta\psi_{-x,z}}{2} \quad \text{и} \quad b_{\delta\,x,z} = b_x - \frac{\Delta\psi_{x,z} - \Delta\psi_{-x,z}}{2}, \qquad (8)$$

то ДН половин ФАР на основе дискретного фазовращателя аналогичны по виду полученным для идеального фазового фронта с заменой a_z на $a_{\delta\,z,x}$ и b_x на $b_{\delta\,x,z}$.

Фазовые ДН половин ФАР с дискретными фазовращателями равны по модулю и противоположны по знаку, поэтому справедливы расчетные соотношения моноимпульсной системы.

По формулам (5) и (7) рассчитаны с помощью ЭВМ сечения нормированных ДН суммарного и угломестного каналов при регулировке фазы с дискретом $\Delta\varphi = \pi/4$. Для сравнения приведены ДН при точном фазировании (гладкое фазовое распределение на непрерывной апертуре). Результаты расчетов приведены на рис. 2. . . 4.

При выставлении луча в направлении нормали ФАР ДН суммарного и угловых каналов при цифровом методе формирования фазового фронта совпадают с аналогичными ДН при идеальном фазовращателе. Действительно, при $\beta_з = 0$ и $\varepsilon_з = 0$ ошибка дискретизации фазы равна нулю. При отклонении луча от нормали появляется ошибка дискретизации фазы $\Delta\psi_{xz}$, которая имеет регулярный характер.

В результате воздействия $\Delta\psi_{xz}$ происходит дополнительный поворот элементарных векторов $A_{xz}e^{-j\alpha_{xz}}$, что, в свою очередь, приводит к относительной расфазировки векторов в заданном направлении и, как следствие, к перераспределению энергии главного лепестка по углам. Результатами перераспределения энергии из-за $\Delta\psi_{xz}$ в ДН суммарного канала являются: снижение на 5 % КПД антенны в главном направлении; незначительное увеличение среднего уровня бокового фона и расширение главного лепестка ДН.

Регулярный характер ошибки дискретизации фазы приводит к возрастанию боковых лепестков ДН $f^E_{\Sigma\delta}$ до – 16 дБ.

Нуль дискриминационной характеристики (см. рис. 3) смещается из-за $\Delta\psi_{xz}$ при направлениях, отличных от направления нормали (см. рис. 4), и имеет максимальное отклонение от нуля, равное 0,01. Незначительно падает крутизна дискриминационной характеристики.

Наличие коммутационных лепестков в ДН суммарного канала ведет к увеличению вероятности ложного обнаружения и аномальным ошибкам измерения из-за захвата цели боковым лепестком ДН.

Для уменьшения коммутационных лепестков вводится фазовая подставка φ_{xz} путем записи в память аппаратуры управления фазой чисел по номерам излучателей и соответствующим выбором длин

Рис. 2. Диаграмма направленности суммарного канала при идеальном и дискретном фазовращателе в сечении $\beta_з = 0$; $\varepsilon_з = 1{,}05$; $\Delta\beta = 0$

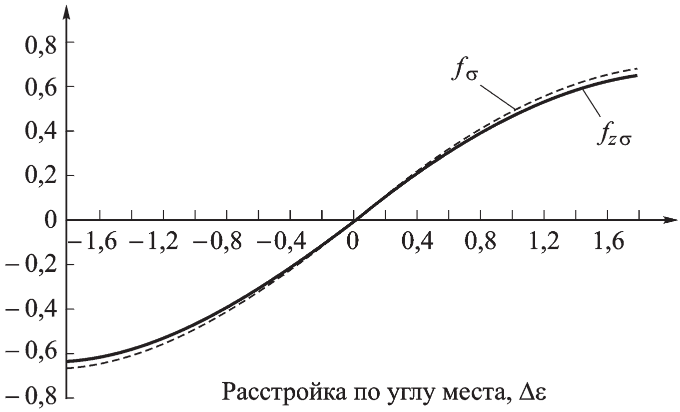


Рис. 3. Диаграмма направленности угломестного канала при идеальном и дискретном фазовращателе в сечении $\beta_з = 0$; $\varepsilon_з = 20{,}1$; $\Delta\beta = 0$

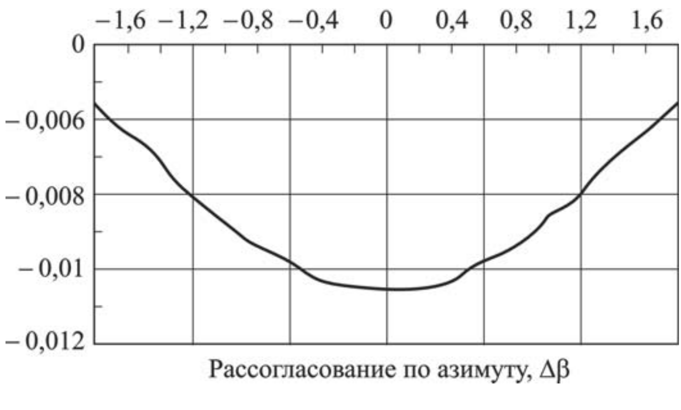


Рис. 4. Смещение нуля дискриминационной характеристики при $\beta_з = 0$; $\varepsilon_з = 20{,}1$; $\Delta\varepsilon = 0$

линий передач до фазовращателей. Фазовая подставка разрушает регулярность $\Delta\psi_{xz}$ и обеспечивает равномерное рассеяние энергии бокового фона в рабочем угловом секторе.

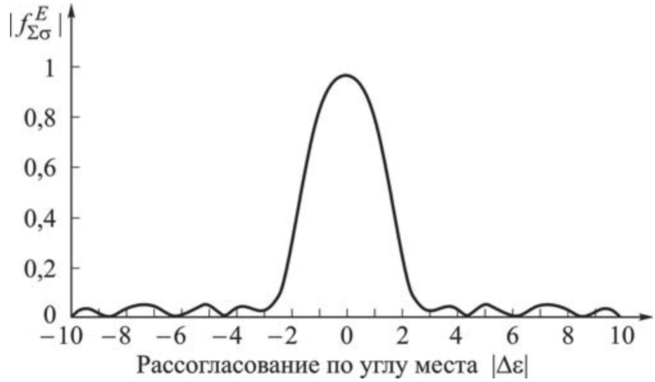


Рис. 5. Диаграмма направленности суммарного канала при дискретном фазовращателе с фазовой подставкой в сечении $\beta_з = 0$; $\varepsilon_з = 1{,}05$; $\Delta\beta = 0$

Ошибка дискретизации фазы при наличии фазовой подставки выражается формулой:

$$\Delta\psi_{xz} = mx_\delta + nz_\delta - \Delta\varphi\left[\frac{mx_\delta + nz_\delta - \varphi_{xz}}{\Delta\varphi} + 0{,}5\right] - \varphi_{xz}. \qquad (9)$$

При введении φ_{xz} уменьшается уровень коммутационных лепестков до −25 дБ. На рис. 5 показана ДН суммарного канала при дискретном фазировании с фазовой подставкой, рассчитанная на ЭВМ для аналогичного (см. рис. 2) сечения ДН.

Значение ДН канала в случае дискретного фазирования определяется не только функцией α_{xz} рассогласования между направлением излучения (приема) и угловыми координатами цели, но также и функцией ошибки установки фазы фазовращателя $\Delta\psi_{xz}$, которая, в свою очередь, зависит от заданного направления и функции фазовой подставки:

$$f_\Sigma = \frac{1}{E_{\max}} \sum_z \sum_x A_{xz} \exp\{-j\,(\alpha_{xz} - \Delta\psi_{xz})\}.$$

Оценим снижение направленных свойств ФАР вследствие наличия $\Delta\psi_{xz}$. Приближение

$$f_\Sigma \approx \frac{1}{E^2_{\max}} \sum_k \sum_l \sum_z \sum_x A_{lk} A_{xz} \exp\{-j\alpha_{xz}\} \exp\{j\Delta\psi_{lk}\} = f_{\Sigma a}$$

справедливо в области главного максимума ДН (превращается в равенство при $\alpha_{xz} \to 0$), которая и является рабочей областью в режиме измерения; в области бокового фона имеет место статистическая эквивалентность функций f_Σ и $f_{\Sigma a}$.

Следовательно, допустимо следующее представление:

$$f_\Sigma = f_{\Sigma k} f_{\Sigma u},$$

где $f_{\Sigma k} = \dfrac{1}{E_{\max}} \sum\limits_k \sum\limits_l A_{lk} \exp\{j\,\Delta\psi_{lk}\}$ есть не что иное, как коэффициент снижения направленных свойств ДН в главном направлении ($\Delta\beta = 0$, $\Delta\varepsilon = 0$) вследствие дискретизации фазового фронта; $f_{\Sigma u} = \dfrac{1}{E_{\max}} \sum\limits_z \sum\limits_x A_{xz} \exp\{-j\alpha_{xz}\}$ — ДН ФАР при идеальном (непрерывном) фазовом фронте и отсутствии амплитудно-фазовых ошибок.

Интегральный эффект фазовых ошибок дискретизации по излучателям ФАР проявляется в появлении дополнительных ошибок угломерии.

Оценка угловых ошибок измерения. Рассмотрим единичные ошибки измерения угловых координат объекта при наличии ошибок дискретизации фазы на примере угломестной координаты.

Дискретизация фазового фронта приводит к иной модели измерения, отличной от с модели [6]

$$\varepsilon_{\text{ц}} = \arcsin\left(\sin\varepsilon_{\text{з}} - \frac{\lambda}{\pi d_{\text{б}}}\frac{\hat{\varphi}}{2}\right),$$

полученной в предположении плоского непрерывного фазового фронта. Отсюда вытекает задача оценки точности угловой координаты на основе типовой модели измерения при дискретном фазовом фронте в апертуре ФАР.

Для получения чистой составляющей угловой ошибки измерения, возникающей при дискретизации фазового фронта $\Delta\varepsilon_2$, следует вычислять значение базы моноимпульсной системы $d_{\text{б}}$ в соответствии с точным положением фазовых центров при гладком фазовом фронте.

Тогда получаем расчетное соотношение для оценки $\Delta\varepsilon_2$:

$$\Delta\varepsilon_2 = \varepsilon_{\text{ц}} - \varepsilon_{\delta\text{ц}} = \varepsilon_{\text{ц}} - \arcsin\left\{\left(1 - \frac{\delta_\varphi}{\varphi}\right)\sin\varepsilon_{\text{ц}} + \frac{\delta_\varphi}{\varphi}\sin\varepsilon_{\text{з}}\right\}, \qquad (10)$$

где $\varepsilon_{\delta\text{ц}} = \arcsin\left(\sin\varepsilon_{\text{з}} - \dfrac{\lambda\varphi_\delta}{2\pi d_{\text{б}}}\right)$ — оценка угловой координаты объекта на основе типовой модели измерения при дискретном фазовом фронте;

$$\varphi_\delta = 2\mathrm{arctg}\frac{E_{\delta\,\varepsilon}}{E_{\delta\,\Sigma\perp}} = 2\mathrm{arctg}\frac{|f_{\delta\,\varepsilon}|\,e^{j\varphi_\varepsilon}}{|f_{\delta\,\Sigma}|\,e^{j(\varphi_\Sigma+\pi/2)}} \;-$$

оценка разностной фазы между фазовыми центрами моноимпульсной системы при дискретном фазовом фронте в апертуре ФАР;
$E_{\delta\,\varepsilon}$, $E_{\delta\,\sum\perp}$ — напряжения при дискретном фазовом рапределении на выходе угломестного канала компаратора и суммарного канала после поворота на $\pi/2$;

$$|f_{\delta\,\varepsilon}| = \sqrt{f_{\varepsilon\,c}^2 + f_{\varepsilon\,s}^2} \;-$$

модуль множителя решетки угломестного канала при дискретном фазовом фронте;

$$\varphi_\varepsilon = -\mathrm{arctg}\frac{f_{\varepsilon\ s}}{f_{\varepsilon\ c}};$$

$$f_{\varepsilon\ c} = \frac{1}{E_{\max}}\left(\sum_{z=-Z}^{Z}\sum_{x=-Xz}^{-1} A_{xz}\cos\alpha_{\delta\ xz} - \sum_{z=-Z}^{Z}\sum_{x=1}^{Xz} A_{xz}\cos\alpha_{\delta\ xz}\right),\ z \neq 0;$$

$$f_{\varepsilon\ s} = \frac{1}{E_{\max}}\left(\sum_{z=-Z}^{Z}\sum_{x=-Xz}^{-1} A_{xz}\sin\alpha_{\delta\ xz} - \sum_{z=-Z}^{Z}\sum_{x=1}^{Xz} A_{xz}\sin\alpha_{\delta\ xz}\right),\ z \neq 0 \ -$$

косинусная и синусная составляющие множителя решетки угломестного канала при дискретном фазовом фронте;

$$\alpha_{\delta\ xz} = \alpha_{xz} - \Delta\psi_{xz}\ \ -$$

фаза поля от излучателя ФАР с координатами x_δ и z_δ в дальней зоне ФАР при дискретном фазовом распределении;

$$\alpha_{xz} = a_z + b_x\ \ -$$

фаза поля от излучателя ФАР с координатами в дальней зоне ФАР при гладком фазовом фронте; $\Delta\psi_{xz}$ — ошибка дискретизации фазы (3);

$$\varphi = 2\,\mathrm{arctg}\,\frac{E_\varepsilon}{E_{\Sigma\perp}} = 2\,\mathrm{arctg}\,\frac{\sum\limits_{z=1}^{Z}\sum\limits_{x=1}^{Xz} A_{xz}\cos a_z \sin b_x}{\sum\limits_{z=1}^{Z}\sum\limits_{x=1}^{Xz} A_{xz}\cos a_z \cos b_x}\ \ -$$

оценка разностной фазы между фазовыми центрами моноимпульсной системы при гладком фазовом распределении на непрерывной апертуре;

$$\delta_\varphi = \varphi - \varphi_\delta\ \ -$$

ошибка разностной фазы между фазовыми центрами моноимпульсной системы из-за дискретизации фазового фронта в апертуре ФАР;

$$\left|f_{\delta\ \Sigma}\right| = \sqrt{f^2_{\Sigma\ c} + f^2_{\Sigma\ s}}\ \ -$$

модуль множителя решетки суммарного канала при дискретном фазовом фронте;

$$\varphi_\Sigma = -\mathrm{arctg}\frac{f_{\Sigma\ s}}{f_{\Sigma\ c}};$$

$$f_{\Sigma\ c} = \frac{1}{E_{\max}}\sum_{z=-Z}^{Z}\sum_{x=-Xz}^{Xz} A_{xz}\cos\alpha_{\delta\ xz},\quad z \neq 0,\quad x \neq 0;$$

$$f_{\sum s} = \frac{1}{E_{\max}} \left(\sum_{z=-Z}^{Z} \sum_{x=-Xz}^{Xz} A_{xz} \sin \alpha_{\delta\, xz} \right), \quad z \neq 0, \quad x \neq 0 \; -$$

косинусная и синусная составляющие множителя решетки суммарного канала при дискретном фазовом распределении;

$$a_z = \frac{2\pi d}{\lambda} \overline{z} \left(\sin \beta_{з} - \sin \beta_{ц} \right); \quad b_x = \frac{2\pi d}{\lambda} \overline{x} \left(\sin \varepsilon_{з} - \sin \varepsilon_{ц} \right);$$

d — период эквидистантной решетки излучателей ФАР;

$$\overline{z} = \begin{cases} z - \dfrac{1}{2} & \text{при } \; z > 0; \\ z + \dfrac{1}{2} & \text{при } \; z < 0; \end{cases} \qquad \overline{x} = \begin{cases} x - \dfrac{1}{2} & \text{при } \; x > 0; \\ x + \dfrac{1}{2} & \text{при } \; x < 0 \end{cases} \quad -$$

координаты излучателей относительно геометрического центра полотна антенны.

Вывод соотношения (10) приведен далее (см. Приложение).

Рассчитанные значения ошибки $\Delta\varepsilon_2$ приведены в виде графиков на рис. 6, *а*. . . *г*.

Расчеты выполнены для ФАР с круглой апертурой антенного полотна с эквидистантной строчно-столбцовой матрицей, заполненной 812 излучателями. Основные параметры полотна ФАР: $d/\lambda = 0{,}875$; $\Delta\phi = \pi/4$; число излучателей, расположенных вдоль радиуса раскрыва, $z = 16$. Амплитудное распределение показано на рис. 7. В фазовое распределение введена квадратичная подстановка.

Расчеты систематической ошибки $\Delta\varepsilon_2$ (в градусах) для антенны с указанными ранее параметрами можно значительно упростить и ускорить, если использовать аппроксимирующую функцию:

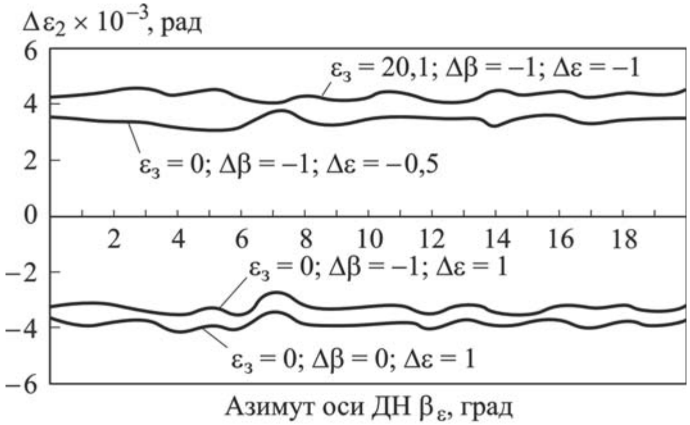
$$\Delta\varepsilon_2 = 0{,}057 \left[0{,}9 \left(\Delta\beta \right)^2 - 0{,}05 \left| \varepsilon_{з} \right| - 6{,}1 \right] \sin \left(138 \Delta\varepsilon \right). \qquad (11)$$

Аппроксимация (11) вместо (10) позволяет существенно сократить число алгоритмических операций и число используемых при расчетах $\Delta\varepsilon_2$ параметров, что чрезвычайно важно для алгоритмов управления системами в масштабе реального времени. При этом результаты замеров могут быть уточнены путем корректировки полученных значений $\varepsilon_{ц}$ на величину $\Delta\varepsilon_2$:

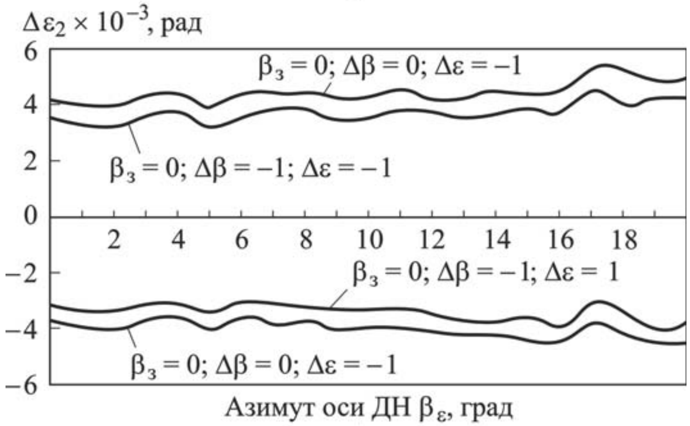
$$\hat{\varepsilon}_{ц} = \varepsilon_{ц} - \Delta\varepsilon_2.$$

Методика коррекции результатов измерения азимутальной координаты полностью идентична рассмотренной.

Приложение. Вывод соотношения (10). Представление половин ФАР в виде эквивалентных точечных излучателей, расположенных в фазовых центрах моноимпульсной системы на расстоянии длины



а



б

Рис. 6 (Начало). Угловые ошибки из-за дискретизации фазового фронта в зависимости от углового положения оси ДН (*а*, *б*) и объекта (*в*, *г*)

базы $d_б$, приводит к соотношениям связи угловых координат цели с измеряемой фазой.

Разность хода лучей от цели до фазовых центров для зоны Фраунгофера $\Delta r = d_б \sin\varepsilon_ц$ определяет разностную фазу принятого сигнала

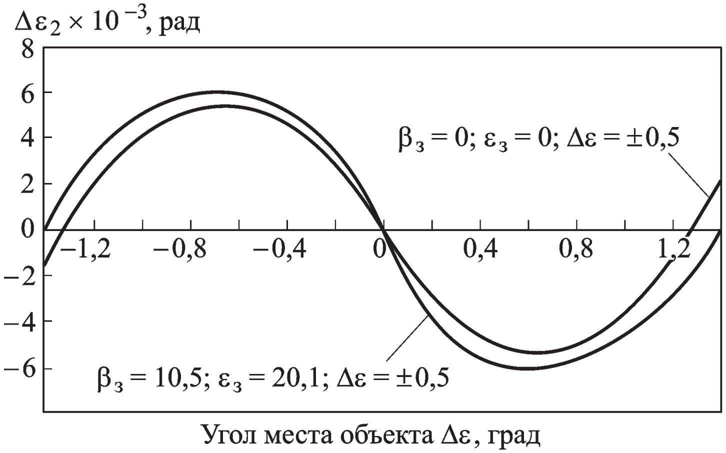
$$\varphi_п = -\frac{2\pi d_б}{\lambda}\sin\varepsilon_ц.$$

Компенсируемый набег фазы за счет фазовращателей, выставляющих максимум ДН в направлении $\varepsilon_з$, составляет

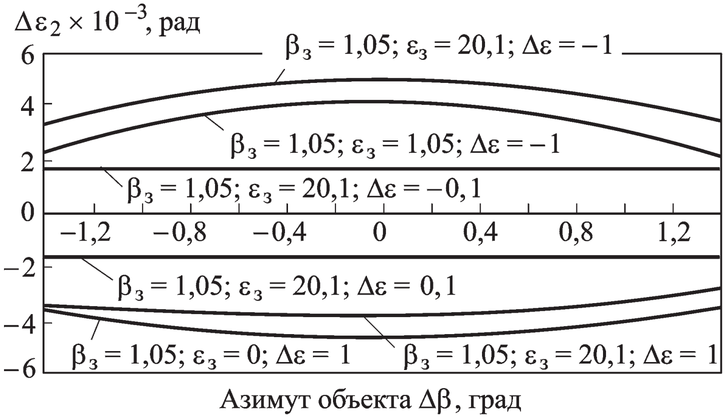
$$\varphi_к = -\frac{2\pi d_б}{\lambda}\sin\varepsilon_з.$$

Следовательно, разностная фаза между фазовыми центрами моноимпульсной системы определяется разностью

$$\varphi = \varphi_п - \varphi_к = \frac{2\pi d_б}{\lambda}(\sin\varepsilon_з - \sin\varepsilon_ц).$$



в



г

Рис. 6 (окончание)

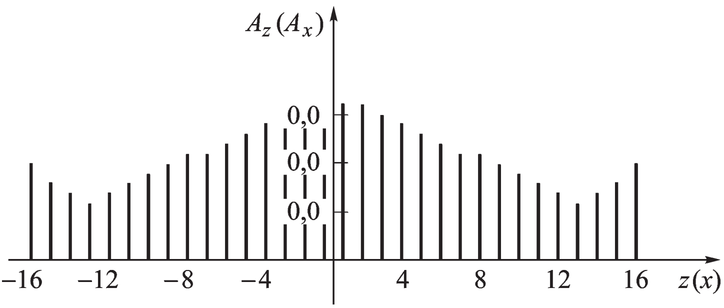


Рис. 7. Амплитудное распределение в сечениях по геометрическим осям симметрии ФАР

Откуда следует выражение для вычисления базы в ε-плоскости (значение базы моноимпульсной системы $d_б$ в соответствии с точным положением фазовых центров при гладком фазовом фронте):

$$d_б = \frac{\varphi\lambda}{2\pi(\sin\varepsilon_з - \sin\varepsilon_ц}.$$

Чтобы получить чистую угловую ошибку измерения при дискретизации фазового фронта $\Delta\varepsilon_2$ следует вычислять длину базы моноимпульсной системы $d_{\text{б}}$ в соответствии с точным положением фазовых центров при гладком фазовом фронте.

Тогда получаем соотношение для оценки $\Delta\varepsilon_2$:

$$\Delta\varepsilon_2 = \varepsilon_{\text{ц}} - \varepsilon_{\delta\text{ц}} = \varepsilon_{\text{ц}} - \arcsin\left\{\sin\varepsilon_{\text{з}} - \frac{\lambda\varphi_\delta}{2\pi d_{\text{б}}}\right\},$$

где $\varepsilon_{\delta\text{ц}} = \arcsin\left\{\sin\varepsilon_{\text{з}} - \frac{\lambda\varphi_\delta}{2\pi d_{\text{б}}}\right\}$ — оценка угловой координаты объекта на основе типовой модели измерения при дискретном фазовом фронте.

После подстановки

$$d_{\text{б}} = \frac{\varphi\lambda}{2\pi(\sin\varepsilon_{\text{з}} - \sin\varepsilon_{\text{ц}})}$$

(значения базы моноимпульсной системы в соответствии с точным положением фазовых центров при гладком фронте) и введения обозначения $\delta_\varphi = \varphi - \varphi_\delta$ для ошибки разностной фазы между фазовыми центрами моноимпульсной системы из-за дискретизации фазового фронта в апертуре ФАР получаем:

$$\Delta\varepsilon_2 = \varepsilon_{\text{ц}} - \varepsilon_{\delta\text{ц}} = \varepsilon_{\text{ц}} - \arcsin\left\{\left(1 - \frac{\delta_\varphi}{\varphi}\right)\sin\varepsilon_{\text{ц}} + \frac{\delta_\varphi}{\varphi}\sin\varepsilon_{\text{з}}\right\}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Ю. П., Матвеев Н. П., Пивоваров Ю. Л. Функция неопределенности ЛЧМ сигнала, получаемого методом дискретной фазовой модуляции // Радиотехника. – 1981. – № 10.
2. Абрамов А. А., Черняков М. С. Повышение точности пеленгации в ФАР с дискретным фазированием // Радиотехника. – 1993.
3. Самойленко В. И., Шишов Ю. А. Управление фазированными антенными решетками. – М.: Радио и связь, 1983.
4. Новоселов Е. К., Потравка В. Ф., Чернышов В. С., Шпунтов А. И. Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. – М.: Связь, 1980. – Вып. 28.
5. Володарский В. Я. Метрология и радиоэлектроника // Радиотехника. – 2003. – № 12.
6. Коростелев А. А., Клюев Н. Ф., Мельник Ю. А. и др. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1978.

Статья поступила в редакцию 12.03.2008

Николай Петрович Матвеев родился в 1950 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Ведущий специалист НТЦ ОАО “научно-производственный комплекс “НИИДАР”. Автор более 40 научных работ в области моделирования радиолокационных систем и устройств.

N.P. Matveev (b. 1950) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. Leading specialist of scientific and technical center of JSC “Nauchno-proizvodstvennyi kompleks NIIDAR”. Author of more than 40 publications in the field of simulation of radio location systems and devices.