

УДК 621.396

Потенциальная точность измерения направления на излучатель для пеленгационных средств с кольцевыми антенными решетками

А. В. Дубровин

Предложена оценка потенциальной точности измерений пеленга, полученная на основе границы Крамера-Рао; показано, что для антенно-фидерных систем, у которых антенны расположены равномерно по кругу, потенциальная точность не зависит от направления прихода сигнала.

The estimation of potential accuracy of measurements direction, received on the basis of Kramer-Rao lower bound. It is shown, that for array antennas at which aeriels are located in regular intervals on a circle, potential accuracy does not depend on a direction of arrival of a signal.

Введение. Пассивная система измерения координат излучателей, состоящая из узкобазовых подсистем, была рассмотрена в [1]. Для сравнения совместно с ней в [1] рассматривалась пеленгационная система. Для нее была получена граница Крамера-Рао ошибок измерений пеленга в общем виде и выражение, описывающее потенциальную точность измерения пеленга для антенной решетки (АР), состоящей из четырех антенн. Если учесть, что использование кольцевых АР является достаточно популярным, то получение выражения, описывающего потенциальную точность измерений пеленга в явном виде для произвольного числа антенн, расположенных по кругу, является серьезным подспорьем в инженерной практике.

Потенциальная точность измерений пеленга. Представление для потенциальной точности измерений угловых координат излучателя было получено в [1, формула (25)]. На практике достаточно часто важны ситуации, когда необходимо оценить потенциальные возможности средства пеленгования при условии, что угол места принимаемого сигнала равен нулю. Чтобы получить выражения, удобные для анализа, необходимо сделать некоторые допущения.

Предположим, что сигнал и шумы являются стационарными, эргодическими, независимыми между собой гауссовскими процессами с нулевыми средними. Сигнал является узкополосным, лежащим в диапазоне частот от f_1 до f_2 , с шириной спектра $2\Delta_f$, при этом $2\Delta_f \ll f_0$ ($\Delta_f = (f_2 - f_1)/2$, $f_0 = (f_2 + f_1)/2$). Спектральная плотность мощности (СПМ) сигнала является прямоугольной, т.е. не зависящей от частоты в полосе $2\Delta_f$. В этом случае граница Крамера-Рао ошибок измерений пеленга выглядит следующим образом

$$\sigma_\alpha^2 = (\mathbf{B}_\alpha^T \Phi_{T\varphi}^{-1} \mathbf{B}_\alpha)^{-1}, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{B}_\alpha^T = \|B_\alpha(1) \dots B_\alpha(M-1)\|;$$

$$B_\alpha(\mu) = \frac{1}{c} [-(X_m - X_1) \sin(\alpha) + (Y_m - Y_1) \cos(\alpha)];$$

$$\mu = m-1; m = \overline{2, M};$$

X_i, Y_i – координаты антенны A_i , $i = \overline{1, M}$ (на рис. 1, а представлена АР, состоящая из семи антенн); α – направление на излучатель; $\Phi_{T\varphi}^{-1} = P(ME - 1)$ – ковариационная матрица ошибок измерений вектора

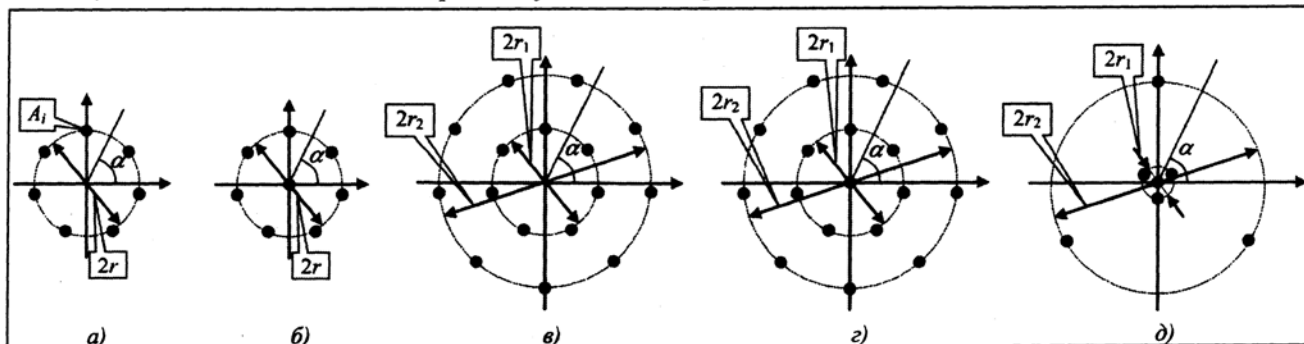


Рис. 1. Конфигурации кольцевых АР, используемых в комплексах пеленгования

фазовых задержек T_ϕ ; $P = 16\pi^2 T_H f_0^2 \Delta_f q^2 / (1 + Mq)$; E – единичная матрица размером $(N-1) \times (N-1)$; 1 – матрица размером $(N-1) \times (N-1)$, у которой все элементы равны 1; T_H – время наблюдения; $q = a^2 G_s / G_z$ – отношение сигнал/шум; a – амплитуда принимаемого сигнала; G_s – СПМ сигнала; G_z – СПМ шума; M – число антенн; c – скорость распространения сигнала.

Рассмотрим вариант, когда антенны располагаются равномерно по кругу, причем их координаты могут быть представлены в виде

$$X_i = r \sin(2\pi(i-1)/M), Y_i = r \cos(2\pi(i-1)/M).$$

В этом случае проявляется достаточно интересное свойство выражения (1) – погрешность измерения пеленга σ_α не зависит от угла прихода сигнала и может быть представлена в достаточно удобном для анализа виде

$$\sigma_\alpha = \frac{c\sqrt{1+Mq}}{M\pi f_0 q r \sqrt{8T_H \Delta_f}}. \quad (2)$$

На основании (2) легко прогнозировать поведение среднеквадратического отклонения (СКО) в зависимости от радиуса АР, числа антенн, отношения сигнал/шум и т. д.

Рассмотрим теперь еще один вариант расположения антенн, также достаточно широко используемый, – с наличием центральной антенны. Он представлен на рис. 1,б для $M=8$. В этом случае СКО также не зависит от направления прихода волны и может быть представлена в виде

$$\sigma_\alpha = \frac{c\sqrt{1+Mq}}{\pi f_0 q r \sqrt{8M(M-1)T_H \Delta_f}}. \quad (3)$$

Помимо однокольцевых АР широкое применение находят двухкольцевые АР. На рис. 1,в представлен вариант двухкольцевой АР, имеющей семь антенн на круге радиусом r_1 и девять антенн на большом круге радиусом r_2 . В этом случае СКО выглядит следующим образом

$$\sigma_\alpha = \frac{c\sqrt{1+(M_1+M_2)q}}{\pi f_0 q \sqrt{8(M_1+M_2)(M_1 r_1^2 + M_2 r_2^2)T_H \Delta_f}}, \quad (4)$$

где M_1 – число антенн на малом круге, M_2 – число антенн на большом круге; M – общее число антенн (здесь $M=M_1+M_2$).

И, наконец, рассмотрим структуру АР аналогичную предыдущему случаю с наличием антенны еще и в центре (рис. 1,г). Теперь СКО описывается следующим выражением

$$\sigma_\alpha = \frac{c\sqrt{1+(M_1+M_2+1)q}}{\pi f_0 q \sqrt{8(M_1+M_2+1)(M_1 r_1^2 + M_2 r_2^2)T_H \Delta_f}}, \quad (5)$$

где M_1 – число антенн на малом круге, M_2 – число антенн на большом круге; общее число антенн $M=M_1+M_2+1$.

Результаты моделирования. Для того чтобы получить дополнительное подтверждение правильности математических выкладок и сделанных при их выводе допущениях целесообразно воспользоваться моделированием на ЭВМ. Выберем следующую конфигурацию антенно-фидерной системы (АФС) (рис. 1,д). В данном случае исходные данные следующие: $r_1=0,12$ м, $r_2=0,6$ м, $f_0=50$ МГц, $2\Delta_f=32$ кГц, $T_H=1$ мс, $M_1=M_2=3$. Для данного типа АФС среднеквадратичная ошибка (СКО) рассчитывается на основании выражения (5). На рис. 2 представлена зависимость σ_α от отношения сигнал/шум $q_{lg}=10\lg(q)$. По оси ординат здесь откладывается СКО (теоретическая и измеренная), а по оси абсцисс – q_{lg} в децибелах. Сплошной линией обозначена кривая, рассчитанная в соответствии с (5). Крестиками отмечены значения выборочных СКО, полученные в результате моделирования. Их соединяет штрихпунктирная линия.

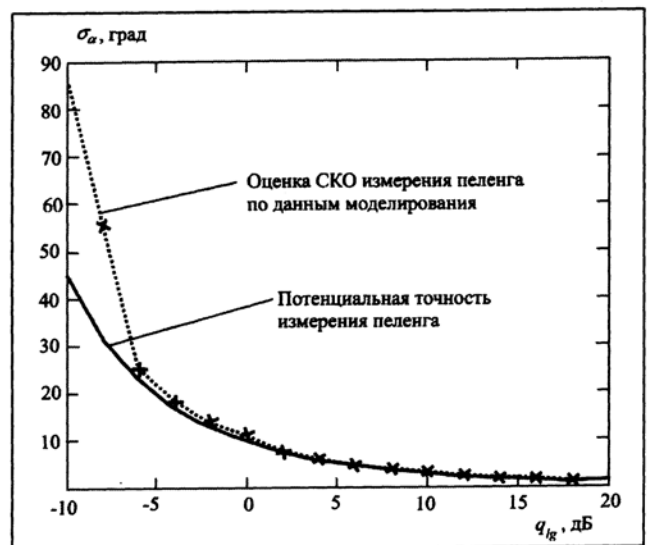


Рис. 2. Графики зависимости ошибок измерений пеленга, полученные на основе моделирования и формулы (5)

Выборочное СКО рассчитывалось по правилу

$$\sigma_{\text{в}\alpha} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\alpha_n - \hat{\alpha}_n)^2 \right]^{1/2},$$

где α_n – истинное значение пеленга; $\hat{\alpha}_n$ – оценка пеленга на n -м испытании; N – число испытаний ($N=100$). Как видно из графика, для выбранных условий теоретическая граница достаточно хорошо описывает погрешность измерений пеленга до отношения сигнал/шум -5 дБ.

- Предложен достаточно широкий набор выражений, позволяющий производить оценку работы пеленгационного средства, имеющего кольцевую антенную решетку. Проведенное моделирование дополнительно подтвердило справедливость полученных решений.

Литература

1. Дубровин А. В., Сосулин Ю. Г. Одноэтапное оценивание местоположения источника радиоизлучения пассивной системой, состоящей из узкобазовых подсистем. – Радиотехника и электроника, 2004, т. 49, № 2, с. 156–170.

Поступила 20 июня 2005 г.

Дубровин Александр Викторович (1962 г. р.) – канд. техн. наук, ген. директор ЗАО «Радий ТН».
Область научных интересов: пассивные системы измерения координат источников радиоизлучений.