ISSN 2224-1159

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»

ВЕСТНИК ВОЕННОЙ АКАДЕМИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

№ 4 (45) 30 декабря 2014 г.

ВОЕННЫЙ НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

ВЕСТНИК ВОЕННОЙ АКАДЕМИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

№ 4 (45) 30 декабря 2014 г.

Военный научно-теоретический журнал

Издается с 2003 года

Адрес редакции:
220057, г. Минск-57, учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь», главный корпус, комн. № 264 А.
Тел./факс: 287-45-15.
Издатель:
Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь».
Свидетельство № 2218 от 07.04.2004.
Набор и верстка:
Демидова А. К.
Дизайн обложки:
Мацкевич А. Н.
Печать:
Изд. лицензия № 02330/0494406 от 27.03.2009.
Подписано в печать 20.12.14 г.
Формат 60×84/8. Бумага писчая.
Гарнитура «Таймс». Печать ризография. Усл. печ. л. 24,41.
Тираж 100 экз. Зак. 448.
Отпечатано в типографии учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».
220057, Минск-57.

СОДЕРЖАНИЕ

ФАЗОВЫЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ДАЛЬНОСТИ ПО ВЫХОДУ ДЕЦИМАТОРА ОТСЧЕТОВ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

УДК 621.396

А. А. Зинченко, В. И. Слюсар*

В статье усовершенствован разработанный ранее фазовый метод оценивания дальности до цели за счет использования операции прореживания по выходу дециматора отсчетов аналого-цифрового преобразователя. Применение метода позволит существенно снизить требования к вычислительной мощности процессоров цифровой обработки сигналов в соответствующих практических приложениях. Работоспособность предложенного метода была подтверждена моделированием в пакете Mathcad для случая одновременного измерения дальности до двух целей.

In article improved the previously developed phase method of estimating the distance to a target through the use of the analog-to-digital converter samples thinning operation out of decimator. Method application will significantly reduce the demands of the processors computing power for digital signal processing in the respective practical applications. The performance of the propose method was confirmed by MathCad simulation for the case of distance to two targets simultaneous measurement.

Один из вариантов реализации фазового метода измерения расстояний до объектов состоит в последовательном облучении целей сигналами разных частот, отличающимися одна от другой на постоянный частотный интервал Δf. В работе [1] был предложен цифровой вариант реализации указанного метода фазовой дальнометрии, в котором задача оценки дальности сводится к решению алгебраического уравнения, сформированного по отсчетам напряжений сигналов разных частот. Однако ограничением метода [1] является применение непосредственной обработки исходных отсчетов аналого-цифрового преобразования, которое при высокой скорости оцифровки сигналов накладывает определенные ограничения на быстродействие устройств измерения расстояний. Более эффективным в этом случае является использование операции децимации (прореживания) отсчетов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [2], что позволяет уменьшить информационный поток в целях снижения нагрузки на устройство обработки сигналов. Ниже приведен цифровой метод фазовых измерений дальности с последовательным облучением целей сигналами разных частот при применении децимации отсчетов АЦП.

Сформируем систему уравнений, которая позволяет осуществить оценку расстояния до цели фазовым методом. Отберем для формирования системы уравнений пару отсчетов напряжений сигналов разных частот по выходу дециматора, используя одинаковые по номеру следования отсчеты в текущем зондировании. Пренебрегая наличием шумов, получим:

$$\begin{cases} U_{1,y} = \dot{a}_1 F_1(r)\, Z(f_1), \\ U_{2,y} = \dot{a}_2 F_2(r)\, Z(f_2), \end{cases} \tag{1}$$

где $F_k(r) = \exp(j4\pi r f_k c^{-1})$, r – расстояние до цели; f_k – частота сигнала в k-м зондировании; c – скорость света; $\dot{a}_k$ – комплексная амплитуда сигнала k-й частоты (полагается постоянной в течение всего интервала существования сигнала k-й частоты); $Z(f_k)$ – значение амплитудно-частотной характеристики дециматора на частоте f_k; y – порядковый номер отсчета сигнальной смеси по выходу дециматора.

Разделим второе уравнение системы (1) на первое:

$$\frac{U_{2,y}}{U_{1,y}}=\frac{a_2}{a_1}\frac{F_2(r)}{F_1(r)}\frac{Z(f_2)}{Z(f_1)}$$

Отсюда

$$\frac{F_2(r)}{F_1(r)}=\frac{U_{2,y}}{U_{1,y}}\frac{Z(f_1)}{Z(f_2)}\frac{a_1}{a_2}.$$

С другой стороны,

$$\frac{F_2(r)}{F_1(r)}=\frac{\exp\left(j4\pi r f_2 c^{-1}\right)}{\exp\left(j4\pi r f_1 c^{-1}\right)}=\exp\left(j\frac{4\pi r f_2}{c}-j\frac{4\pi r f_1}{c}\right)=\exp\left(j\frac{4\pi r\Delta f}{c}\right), \tag{2}$$

где $\Delta f = f_2 - f_1$.

Таким образом,

$$\exp\left(j\frac{4\pi r\Delta f}{c}\right)=\frac{U_{2,y}}{U_{1,y}}\frac{Z(f_1)}{Z(f_2)}\frac{a_1}{a_2}. \tag{3}$$

Возьмем натуральный логарифм от левой и правой частей уравнения (3):

$$j\frac{4\pi r\Delta f}{c}=\ln\left(\frac{U_{2,y}}{U_{1,y}}\frac{Z(f_1)}{Z(f_2)}\frac{a_1}{a_2}\right). \tag{4}$$

Решением равенства (4) относительно неизвестной оценки дальности будет соотношение

$$r=\mathrm{Re}\left[j\frac{c}{4\pi\Delta f}\ln\left(\frac{U_{2,y}}{U_{1,y}}\frac{Z(f_1)}{Z(f_2)}\frac{a_1}{a_2}\right)\right]. \tag{5}$$

Таким образом, для измерения дальности цели предложенным методом необходимо иметь информацию о соотношении комплексных амплитуд двух гармонических сигналов разных частот и вычислить соотношение комплексных напряжений отсчетов дециматора с одинаковым номером следования в каждом из двух периодов зондирования.

При этом считается, что частоты сигналов известны, то есть предварительно были определены доплеровские сдвиги частот или они являются довольно малыми и ими можно пренебречь.

Выражение (5) может быть упрощено, если выполняется условие равенства комплексных амплитуд сигналов двух частот, т. е. $a_1 = a_2$. В результате

$$r=\mathrm{Re}\left[j\frac{c}{4\pi\Delta f}\ln\left(\frac{U_{2,y}}{U_{1,y}}\frac{Z(f_1)}{Z(f_2)}\right)\right]$$

Выполнение условия совпадения комплексных амплитуд базируется на облучении цели когерентыми сигналами с одинаковой начальной фазой и незначительным частотным разнесением $\Delta f = f_2 - f_1$, что позволяет пренебречь проявлением частотной зависимости комплексного коэффициента отражения сигналов от цели. Реальные отклонения от такого условия будут приводить к появлению определенных погрешностей в измерении расстояния, однако не лишат предложенный метод работоспособности.

В случае произвольного количества целей система уравнений (1) может быть записана в виде

$$\begin{cases} U_{1,y} = \dot a_{1,1}F_1(r_1)Z_y(f_1) + a_{1,2}F_1(r_2)Z_y(f_1) + a_{1,3}F_1(r_3)Z_y(f_1) + \ldots + \dot a_{1,M}F_1(r_M)Z_y(f_1), \\ U_{2,y} = a_{2,1}F_2(r_1)Z_y(f_2) + a_{2,2}F_2(r_2)Z_y(f_2) + a_{2,3}F_2(r_3)Z_y(f_2) + \ldots + \dot a_{2,M}F_2(r_M)Z_y(f_2), \\ U_{3,y} = a_{3,1}F_3(r_1)Z_y(f_3) + a_{3,2}F_3(r_2)Z_y(f_3) + a_{3,3}F_3(r_3)Z_y(f_3) + \ldots + a_{3,M}F_3(r_M)Z_y(f_3), \\ \vdots \\ U_{K,y} = \dot a_{K,1}F_K(r_1)Z_y(f_K) + \dot a_{K,2}F_K(r_2)Z_y(f_K) + \dot a_{K,3}F_K(r_3)Z_y(f_K) + \ldots + a_{K,M}F_K(r_M)Z_y(f_K), \end{cases} \tag{6}$$

где $\dot a_{k\,m}$ – комплексная амплитуда сигнала, отраженного от m-й цели на k-й частоте; y – порядковый номер отсчета сигнальной смеси по выходу дециматора; $Z_y(f_k)$ – значение амплитудно-частотной характеристики дециматора на частоте f_k в y-м отсчете.

При условии, что комплексные амплитуды сигналов на всех частотах можно считать одинаковыми и независимыми от номера отсчета ($\dot a_{k\,m} = \dot a_m$), систему уравнений (6) перепишем в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot a_1F_1(r_1)Z_y(f_1) + a_2F_1(r_2)Z_y(f_1) + \dot a_3F_1(r_3)Z_y(f_1) + \ldots + \dot a_MF_1(r_M)Z_y(f_1) - U_{1,y} = 0, \\ \dot a_1F_2(r_1)Z_y(f_2) + a_2F_2(r_2)Z_y(f_2) + \dot a_3F_2(r_3)Z_y(f_2) + \ldots + \dot a_MF_2(r_M)Z_y(f_2) - U_{2,y} = 0, \\ a_1F_3(r_1)Z_y(f_3) + \dot a_2F_3(r_2)Z_y(f_3) + a_3F_3(r_3)Z_y(f_3) + \ldots + \dot a_MF_3(r_M)Z_y(f_3) - U_{3,y} = 0, \\ \vdots \\ a_1F_K(r_1)Z_y(f_K) + a_2F_K(r_2)Z_y(f_K) + a_3F_K(r_3)Z_y(f_K) + \ldots + \dot a_MF_K(r_M)Z_y(f_K) - U_{K,y} = 0 \end{cases} \tag{7}$$

Рассмотрим в качестве неизвестных в системе уравнений (7) комплексные амплитуды сигналов, а также множитель $\lambda = -1$ при отсчетах напряжений. Тогда для определителя данной однородной системы уравнений, имеющей по крайней мере одно ненулевое решение ($\lambda = -1$), будет справедливо тождество

$$\begin{vmatrix} Z_y(\omega_1)F_1(r_1) & Z_y(\omega_1)F_1(r_2) & Z_y(\omega_1)F_1(r_3) & \ldots & Z_y(\omega_1)F_1(r_M) & U_{1,y} \\ Z_y(\omega_2)F_2(r_1) & Z_y(\omega_2)F_2(r_2) & Z_y(\omega_2)F_2(r_3) & \ldots & Z_y(\omega_2)F_2(r_M) & U_{2,y} \\ Z_y(\omega_3)F_3(r_1) & Z_y(\omega_3)F_3(r_2) & Z_y(\omega_3)F_3(r_3) & \ldots & Z_y(\omega_3)F_3(r_M) & U_{3,y} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_y(\omega_K)F_K(r_1) & Z_y(\omega_K)F_K(r_2) & Z_y(\omega_K)F_K(r_3) & \ldots & Z_y(\omega_K)F_K(r_M) & U_{K,y} \end{vmatrix} = 0. \tag{8}$$

Для удобства дальнейшего рассмотрения воспользуемся правилом умножения определителя на число, согласно которому умножение всех элементов строки определителя на некоторое число λ равносильно умножению определителя на это число [3]. Соответственно пронормируем каждую из строк определителя (8) на величину $Z_y(\omega_k)$, где $k = 1, \ldots, K$ – порядковый номер строки:

$$\begin{vmatrix} F_1(r_1) & F_1(r_2) & F_1(r_3) & \ldots & F_1(r_M) & \dfrac{U_{1,y}}{Z_y(\omega_1)} \\ F_2(r_1) & F_2(r_2) & F_2(r_3) & \ldots & F_2(r_M) & \dfrac{U_{2,y}}{Z_y(\omega_2)} \\ F_3(r_1) & F_3(r_2) & F_3(r_3) & \ldots & F_3(r_M) & \dfrac{U_{3,y}}{Z_y(\omega_3)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ldots & \\ F_K(r_1) & F_K(r_2) & F_K(r_3) & \ldots & F_K(r_M) & \dfrac{U_{K,y}}{Z_y(\omega_K)} \end{vmatrix} = 0. \tag{9}$$

Следуя методике решения однородных систем уравнений, изложенной в [4], рассмотрим $Y - M$ таких однородных уравнений с изменяющимся от 0 до $(M-1)$ индексом y.

По аналогии с [1] добавим к ним также тождество, в левой части которого вместо столбца нормированных напряжений использован столбец, содержащий функции от неизвестных дальностей до объектов $F_k(r) = \exp\left(j4\pi r f_k c^{-1}\right)$:

$$\begin{vmatrix} F_1(r_1) & F_1(r_2) & F_1(r_3) & \dots & F_1(r_M) & F_1(r) \\ F_2(r_1) & F_2(r_2) & F_2(r_3) & \dots & F_2(r_M) & F_2(r) \\ F_3(r_1) & F_3(r_2) & F_3(r_3) & \dots & F_3(r_M) & F_3(r) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ F_K(r_1) & F_K(r_2) & F_K(r_3) & \dots & F_K(r_M) & F_K(r) \end{vmatrix} = 0 \qquad (10)$$

Разложив определители в левой части выражений (9), (10) по элементам крайних справа столбцов, составим систему уравнений, в которой в качестве неизвестных фигурируют алгебраические дополнения элементов указанных столбцов. В итоге получим

$$\begin{cases} F_1(r)B_1 + F_2(r)B_2 + F_3(r)B_3 + \ldots + F_K(r)B_K = 0, \\ \dfrac{U_{1,0}}{Z_0(\omega_1)}B_1 + \dfrac{U_{2,0}}{Z_0(\omega_2)}B_2 + \dfrac{U_{3,0}}{Z_0(\omega_3)}B_3 + \ldots + \dfrac{U_{K,0}}{Z_0(\omega_K)}B_K = 0, \\ \dfrac{U_{1,1}}{Z_1(\omega_1)}B_1 + \dfrac{U_{2,1}}{Z_1(\omega_2)}B_2 + \dfrac{U_{3,1}}{Z_1(\omega_3)}B_3 + \ldots + \dfrac{U_{K,1}}{Z_1(\omega_K)}B_K = 0, \\ \vdots \\ \dfrac{U_{1,M-1}}{Z_{M-1}(\omega_1)}B_1 + \dfrac{U_{2,M-1}}{Z_{M-1}(\omega_2)}B_2 + \dfrac{U_{3,M-1}}{Z_{M-1}(\omega_3)}B_3 + \ldots + \dfrac{U_{K,M-1}}{Z_{M-1}(\omega_K)}B_K = 0, \end{cases} \qquad (11)$$

где B_k – алгебраическое дополнение k-го элемента в правом столбце определителей в выражениях (9), (10).

Поскольку значения алгебраических дополнений B_k не равны нулю, определитель системы (11) обращается в ноль, что позволяет записать следующее уравнение для оценки неизвестных дальностей целей:

$$\begin{vmatrix} F_1(r) & F_2(r) & F_3(r) & \dots & F_K(r) \\ \dfrac{U_{1,0}}{Z_0(\omega_1)} & \dfrac{U_{2,0}}{Z_0(\omega_2)} & \dfrac{U_{3,0}}{Z_0(\omega_3)} & \dots & \dfrac{U_{K,0}}{Z_0(\omega_K)} \\ \dfrac{U_{1,1}}{Z_1(\omega_1)} & \dfrac{U_{2,1}}{Z_1(\omega_2)} & \dfrac{U_{3,1}}{Z_1(\omega_3)} & \dots & \dfrac{U_{K,1}}{Z_1(\omega_K)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dfrac{U_{1,M-1}}{Z_{M-1}(\omega_1)} & \dfrac{U_{2,M-1}}{Z_{M-1}(\omega_2)} & \dfrac{U_{3,M-1}}{Z_{M-1}(\omega_3)} & \dots & \dfrac{U_{K,M-1}}{Z_{M-1}(\omega_K)} \end{vmatrix} = 0. \qquad (12)$$

Как показано в [1], данное выражение может быть сведено к алгебраическому степенному уравнению. Покажем это на примере задачи оценивания дальности двух целей.

В этом случае для определения дальностей достаточно использовать по два отсчета сигнальной смеси по выходу дециматора на трех последовательно используемых частотах. Соответствующий вариант тождества (12) запишется в виде

$$Q(r)=\begin{vmatrix} F_1(r) & F_2(r) & F_3(r) \\ \dfrac{U_{1,0}}{Z_0(\omega_1)} & \dfrac{U_{2,0}}{Z_0(\omega_2)} & \dfrac{U_{3,0}}{Z_0(\omega_3)} \\ \dfrac{U_{1,1}}{Z_1(\omega_1)} & \dfrac{U_{2,1}}{Z_1(\omega_2)} & \dfrac{U_{3,1}}{Z_1(\omega_3)} \end{vmatrix}=0. \qquad (13)$$

Разложив определитель в (13) по элементам первой строки, несложно получить:

$$Q(r)=F_3(r)\begin{vmatrix} \dfrac{U_{1,0}}{Z_0(\omega_1)} & \dfrac{U_{2,0}}{Z_0(\omega_2)} \\ \dfrac{U_{1,1}}{Z_1(\omega_1)} & \dfrac{U_{2,1}}{Z_1(\omega_2)} \end{vmatrix} - F_2(r)\begin{vmatrix} \dfrac{U_{1,0}}{Z_0(\omega_1)} & \dfrac{U_{3,0}}{Z_0(\omega_3)} \\ \dfrac{U_{1,1}}{Z_1(\omega_1)} & \dfrac{U_{3,1}}{Z_1(\omega_3)} \end{vmatrix} + F_1(r)\begin{vmatrix} \dfrac{U_{2,0}}{Z_0(\omega_2)} & \dfrac{U_{3,0}}{Z_0(\omega_3)} \\ \dfrac{U_{2,1}}{Z_1(\omega_2)} & \dfrac{U_{3,1}}{Z_1(\omega_3)} \end{vmatrix}=0,$$

или после нормировки на множитель $F_1(r)$:

$$Q(r)=\frac{F_3(r)}{F_1(r)}\begin{vmatrix} \dfrac{U_{1,0}}{Z_0(\omega_1)} & \dfrac{U_{2,0}}{Z_0(\omega_2)} \\ \dfrac{U_{1,1}}{Z_1(\omega_1)} & \dfrac{U_{2,1}}{Z_1(\omega_2)} \end{vmatrix} - \frac{F_2(r)}{F_1(r)}\begin{vmatrix} \dfrac{U_{1,0}}{Z_0(\omega_1)} & \dfrac{U_{3,0}}{Z_0(\omega_3)} \\ \dfrac{U_{1,1}}{Z_1(\omega_1)} & \dfrac{U_{3,1}}{Z_1(\omega_3)} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \dfrac{U_{2,0}}{Z_0(\omega_2)} & \dfrac{U_{3,0}}{Z_0(\omega_3)} \\ \dfrac{U_{2,1}}{Z_1(\omega_2)} & \dfrac{U_{3,1}}{Z_1(\omega_3)} \end{vmatrix}=0.$$

Следует учесть, что согласно соотношению (2)

$\dfrac{F_2(r)}{F_1(r)}=\exp\left(j\dfrac{4\pi r\Delta f}{c}\right)$, и аналогично $\dfrac{F_3(r)}{F_1(r)}=\exp\left(j\dfrac{4\pi r2\Delta f}{c}\right)=\left(\exp\left(j\dfrac{4\pi r\Delta f}{c}\right)\right)^2$.

Поэтому, обозначив $D=\exp\left(j\dfrac{4\pi r\Delta f}{c}\right)$, получим $D^2=\dfrac{F_3(r)}{F_1(r)}$, $D=\dfrac{F_2(r)}{F_1(r)}$.

Отсюда приходим к квадратному уравнению относительно неизвестной D:

$$Q(r)=D^2\begin{vmatrix} \dfrac{U_{1,0}}{Z_0(\omega_1)} & \dfrac{U_{2,0}}{Z_0(\omega_2)} \\ \dfrac{U_{1,1}}{Z_1(\omega_1)} & \dfrac{U_{2,1}}{Z_1(\omega_2)} \end{vmatrix} - D\begin{vmatrix} \dfrac{U_{1,0}}{Z_0(\omega_1)} & \dfrac{U_{3,0}}{Z_0(\omega_3)} \\ \dfrac{U_{1,1}}{Z_1(\omega_1)} & \dfrac{U_{3,1}}{Z_1(\omega_3)} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \dfrac{U_{2,0}}{Z_0(\omega_2)} & \dfrac{U_{3,0}}{Z_0(\omega_3)} \\ \dfrac{U_{2,1}}{Z_1(\omega_2)} & \dfrac{U_{3,1}}{Z_1(\omega_3)} \end{vmatrix}=0. \qquad (14)$$

Используя полученные в результате решения (14) корни квадратного уравнения $D_{1,2}$, оценки дальности сформируем в виде

$$r_{1,2}=\mathrm{Re}\left[j\frac{c}{4\pi\Delta f}\ln\left(D_{1,2}\right)\right].$$

Работоспособность предложенного метода фазового измерения дальности двух целей была проверена путем математического моделирования в пакете Mathcad. В модели фазовый шум имитировался в виде изменяемой от отсчета к отсчету АЦП начальной фазы сигнала, одинаковой для всех частот, то есть вместо когерентных сигналов рассматривалась их некогерентная совокупность

Вывод

Таким образом, в статье усовершенствован разработанный ранее фазовый метод оценивания дальности до цели за счет использования операции прореживания по выходу дециматора отсчетов аналого-цифрового преобразователя, что позволило существенно снизить требования к вычислительной мощности процессоров цифровой обработки сигналов в соответствующих практических приложениях. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на анализе достижимой точности измерения дальности, особенно в условиях наличия аддитивных и фазовых шумов.

Список литературы

1. Солощев, О. Н. Фазовый метод измерения дальности на основе теории многоканального анализа / О. Н. Солощев, В. И. Слюсар, В. В. Твердохлебов // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2007. – № 2(23). – С. 29–32.

2. Слюсар, В. И. Синтез алгоритмов измерения дальности *M*-источников при дополнительном стробировании отсчетов АЦП / В. И. Слюсар // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1996. – Т. 39. – № 5. – С. 55–62.

3. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука. – 1984. – 832 с.

4. Варюхин, В. А. Основы теории многоканального анализа / В. А. Варюхин. // – Киев: ВА ПВО СВ, 1993. – 171 с.

5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. А. Петрова и В. Н. Харисова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.

---

*Сведения об авторах:
Зинченко Андрей Александрович,
Национальный университет обороны Украины им. Ивана Черняховского;
Слюсар Вадим Иванович,
Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники Вооруженных сил Украины.
Статья поступила в редакцию 10.03.2014 г.