

СЛЮСАР В. И.

## МЕТОДИКА ПЕРЕСЧЕТА РЕЗУЛЬТАТОВ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ В ОЦЕНКИ ДРУГИХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ

Распространенным в радиолокации методом повышения разрешающей способности по любой из координат является предварительное различение сигналов по другим параметрам. Достижимый при этом эффект может быть существенно улучшен, если использовать процедуры сверхразрешения. Целью статьи является рассмотрение методики трансляции результатов сверхразрешения в оценки остальных параметров сигналов, основанной на использовании односигнальных алгоритмов измерения.

Рассмотрим задачу определения угловых координат  $M$  источников линейной цифровой антенной решеткой (ЦАР) при условии предварительного сверхразрешения целей по дальности. Будем полагать, что после аналого-цифрового преобразования напряжений производится накопление отсчетов АЦП в жестко отведенных интервалах времени — стробах. Ориентируясь на общий случай, условимся, что зондирующие импульсы существуют на протяжении  $T$  таких временных интервалов. Для удобства предположим, что начала отраженных сигналов сосредоточены в одном стробе. Тогда матричная запись откликов  $R$  пространственных каналов ЦАР в  $T$  стробах дальности может быть выражена в виде:

$$V = S A F, \quad (1)$$

где  $V$  — матрица размера  $T \times R$  комплексных напряжений  $V_{im}$  (откликов  $R$  пространственных каналов ЦАР в  $T$  стробах дальности);  $S$  — матрица размера  $T \times M$  аналитических описаний  $S_i(z_m)$  откликов  $T$  стробов дальности для  $M$  сигналов, причем  $z_m$  — смещение  $m$ -го импульса в отсчетах АЦП относительно первого из сигнальных стробов;  $A$  — диагональная матрица порядка  $M$ , главную диагональ которой образует вектор комплексных амплитуд  $a_m$  для  $M$  радиоимпульсов;  $F$  — матрица размера  $M \times R$  значений  $F_i(x_m)$  комплексных характеристик направленности  $R$  приемных каналов в направлениях  $M$  источников ( $x_m$ ).

Полагая, что в результате разрешения сигналов по времени задержки компоненты матрицы  $S$  известны, определим матрицу обобщенных по угловой координате  $x$  комплексных амплитуд сигналов  $P = A F$ . Воспользовавшись для этого методом наименьших квадратов, выразим минимизируемый функционал в виде:

$$L = \text{tr} \left[ \{V - S P\}^* \{V - S P\} \right], \quad (2)$$

где знак « \* » означает комплексно-сопряженное транспонирование. Отсюда, в результате дифференцирования (2) по матрице  $P$ , получим:

$$\frac{\partial L}{\partial P} = -2 \{V - SP\}^* P \quad \text{и} \quad \hat{P} = (S^* S)^{-1} S^* V. \quad (3)$$

Для вещественной матрицы  $S$  знак « \* » соответствует операции обычного транспонирования. Ее элементы могут иметь и комплексный характер, если результаты суммирования отсчетов АЦП в строках не будут совпадать в квадратурных составляющих.

Определив согласно (3) обобщенные амплитуды сигналов, можно решить пеленгационную задачу, применяя известные [1, 2] односигнальные алгоритмы измерения. Существенно, что при этом в качестве напряжений должны фигурировать элементы матрицы  $P$ , соответствующие искомому источнику. При иных расположениях сигналов относительно сетки стробов для определения матрицы (3) необходимо вносить изменения в структуру матрицы  $S$ , обнуляя соответствующие ее элементы. Например, в ситуациях, когда окончание одного сигнала приходится на строб начала следующего, и длительность радиоимпульса совпадает с временной протяженностью строга, матрица  $S$  будет ленточной:

$$S = \begin{bmatrix} S_1(z_1) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ S_2(z_1) & S_2(z_2) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & S_3(z_2) & S_3(z_3) & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & S_T(z_m) \end{bmatrix}.$$

Рассмотренный пример процедуры пересчета легко обобщается на задачу совместного измерения времени задержки и доплеровской частоты, достаточно лишь трактовать элементы матрицы  $F$  как значения частотных характеристик  $R$  фильтров на частотах  $M$  источников. Аналогично, используя понятие обобщенных по времени амплитуд  $Q_{tm} = \dot{a}_m S_t(z_m)$ , осуществляется обратный рассмотренному переход от результатов сверхразрешения по угловым координатам или частоте к односигнальной дальнометрии.

Для вывода соответствующей процедуры пересчета перепишем систему уравнений (1) в виде:

$$V = Q F, \quad (4)$$

где  $Q = S A$  — матрица обобщенных по времени амплитуд сигналов. Применительно к случаю прихода  $M$  радиоимпульсов в одном строге дально-

сти и существовании их на протяжении  $T$  стробов матрица  $Q$  размера  $T \times M$  будет содержать элементы  $a_m S_i(z_m)$ .

Применяя метод наименьших квадратов, получаем для (4) оценку обобщенных по времени амплитуд сигналов:

$$\hat{Q} = (FF^*)^{-1} FV^*. \quad (5)$$

С учетом необходимых для функционирования односигнальных алгоритмов элементов матрицы  $Q$ , несложно определить оценки времени задержки  $z_m$  каждого из сигналов пакета. При прямоугольной огибающей радиоимпульса, длительность которого совпадает с временной протяженностью строба, соответствующая процедура имеет вид

$$\hat{z}_m = \frac{|Q_{1m}|N}{|Q_{1m}| + |Q_{2m}|},$$

где  $z_m$  — смещение  $m$ -го импульса в отсчетах АЦП относительно окончания первого из двух стробов, в которых существует сигнал,  $|Q_{1m}|$ ,  $|Q_{2m}|$  — модули обобщенных по времени амплитуд  $m$ -го сигнала в 1-м и 2-м сигнальных стробах,  $N$  — длительность строба в отсчетах АЦП.

Можно сформулировать суть предлагаемой методики: по результатам сверхразрешения согласно выражениям (3) или (5) определяют обобщенные по соответствующему параметру комплексные амплитуды сигналов и далее используют их в качестве напряжений в рамках односигнальных измерений. Рассмотренный подход позволяет снять ограничения, которые следуют из понятия функции неопределенности для совместного измерения нескольких параметров. В данном случае разрешение по одному из них одновременно означает и разрешение по всем остальным. Важно подчеркнуть, что в предложенных алгоритмах от количества источников зависит только процедура вычисления обобщенных амплитуд, тогда как пересчет их в оценки интересующих параметров производится по одним и тем же односигнальным методам.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Варюхин В. А., Покровский В. И., Сахно В. Ф. Модифицированная функция правдоподобия в задаче измерения угловых координат источников с помощью антенной решетки // ДАН СССР. — 1983. — Т. 270. — № 5.

2. Покровский В. И., Слюсар В. И. Решение измерительных задач в РЛС на базе ЦАР при неидентичности первичных каналов. — Киев, 1992. — Деп. в УкРИНТЭИ 17.12.92, № 1995-Ук 92.

г. Киев.

Поступила после переработки 26.02.96.