

**ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО УРОВНЯ МАТЕРИАЛА В РЕЗЕРВУАРЕ ПРИ НАЛИЧИИ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ЕГО ДНА, ПРЕВЫШАЮЩИХ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛЕЗНЫЙ СИГНАЛ**

Паршин В.С., Багдадюлян А.А.

Рязанская государственная радиотехническая академия

При высокоточном измерении дальности с помощью современных радиоволновых дальномеров с непрерывным частотно-модулированным (ЧМ) излучением до отражающей поверхности жидких сред в замкнутых объемах возникают специфические особенности, которые затрудняют решение этой задачи. Это вызвано тем, что наряду с отражениями от уровня, дальность до которого необходимо измерить, могут иметь место отражения от дна резервуара. В результате сигнал разностной частоты (СРЧ) на интервале времени  $0 \leq t \leq T_m / 2$  можно представить в виде суммы

$$s(t) = S_c \cos \left( \omega_0 \tau_c + \omega_0 \tau_c \left( \frac{4t - 2\tau_c}{T_m} - 1 \right) + \varphi_c \right) + S_\delta \cos \left( \omega_0 \tau_{\delta 0} + \omega_0 \tau_{\delta 0} \left( \frac{4t - 2\tau_{\delta 0}}{T_m} - 1 \right) + \varphi_\delta \right) + \xi(t),$$

где  $\xi(t)$  – белый нормальный шум,  $T_m$  – период модуляции частоты,  $\omega_0$  – несущая частота передатчика,  $\omega_\delta$  – девиация частоты,  $S_c$ ,  $\varphi_c$  – амплитуда и фаза сигнала,  $\tau_c$  – задержка сигнала соответствующая измеряемому расстоянию,  $S_\delta$ ,  $\varphi_\delta$  – амплитуда и фаза мешающего отражения, возникающего от дна резервуара,  $\tau_{\delta 0}$  – задержка сигнала, соответствующая расстоянию до дна резервуара.

Измерение дальности в современных уровнемерах, как правило, осуществляется в спектральной области, для чего определяется частота, на которой находится максимальная спектральная составляющая [1]. Но измерять дальность по максимуму спектральной составляющей СРЧ возможно при условии, если амплитуды мешающих отражений не превышают по амплитуде полезный сигнал. Однако отражения от дна резервуара, в котором производится измерение дальности до уровня материала, могут превышать по амплитуде полезный сигнал, что приводит к невозможности прямого измерения дальности по максимуму спектральной составляющей, так как она будет соответствовать отражению от дна. К тому же наличие мешающих отражений приводит к существенным искажениям спектра полезного сигнала за счет боковых лепестков спектра помехи, что приводит к резкому увеличению погрешности измерения дальности для алгоритмов на основе классических методов спектрального анализа [2]. Поэтому для решения данной задачи целесообразно использовать алгоритмы на основе параметрического спектрального анализа, которые позволяют преодолевать ряд недостатков классических методов.

Исследование различных алгоритмов параметрического спектрального анализа [2-3] (метода наименьших квадратов Прони, EV, MUSIC и др.) показало, что метод наименьших квадратов Прони требует меньше вычислительных затрат по сравнению с алгоритмами EV и MUSIC при сохранении соотношений между мощностями компонент анализируемого процесса, что не выполняется для алгоритмов EV и MUSIC. Однако в псевдоспектре сигнала, получаемого с помощью метода Прони, присутствует множество ложных спектральных составляющих, которые могут превышать полезный сигнал по амплитуде, что существенно затрудняет анализ псевдоспектра для нахождения спектральной составляющей, соответствующей полезному сигналу (особенно в режиме, когда сигнал, отраженный от дна резервуара, превышает по амплитуде полезный сигнал). Алгоритмы, позволяющие находить спектральную составляющую полезного сигнала в псевдоспектре, полученного с помощью метода Прони, получаются достаточно сложными и требующим для своей реализации дополнительных вычислительных операций [3].

Преодолеть сложности, возникающие при использовании метода Прони, позволяет алгоритм спектрального анализа, основанный на анализе собственных значений автокорреляционной матрицы или одной из матриц данных (алгоритм EV) [2]. Ключевой операцией в этом методе является разделение информации, содержащейся в автокорреляционной матрице или матрице данных, на два векторных подпространства – подпространство сигнала и подпространство шума. В этих подпространствах можно определять различные функции от векторов сигнала и шума для получения оценок частоты, графическое представление которых имеет острые пики на частотах синусоид или других узкополосных спектральных компонент. Однако эти оценки не являются оценками истинной спектральной плотности мощности, поскольку они не сохраняют мощность анализируемого процесса.

В варианте метода EV, который используется в данной работе, процедура оценки частоты (дальности) производится в подпространстве шума. Вначале формируется матрица данных из отчетов сигнала  $\bar{s} = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$  следующего вида

$$D = k \cdot \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \dots & s_{N/2} \\ s_2 & s_3 & \dots & s_{N/2+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N/2+1} & s_{N/2+2} & \dots & s_N \end{bmatrix},$$

где  $k$ -нормирующий множитель, зависящий от количества входных отчетов сигнала. Далее находится сингулярное разложение матрицы данных  $D = USV^T$  [4], где матрица  $U$  имеет размер  $N/2 + 1 \times N/2$  и удовлетворяет соотношению  $UU^T = I$ , матрица  $V$  – квадратная порядка  $N/2$  и удовлетворяет соотношению  $VV^T = I$ , а  $S = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_{N/2})$ , где  $\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_{N/2} \geq 0$ . Столбцы  $\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_{N/2}$  матрицы  $U$  являются левыми сингулярными векторами (матрицы  $D$ ). Столбцы  $\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_{N/2}$  матрицы  $V$  являются правыми сингулярными векторами. Величины  $\sigma_i$  являются сингулярными числами. На следующем шаге производится разбиение правых сингулярных векторов  $\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_{N/2}$  на вектора подпространства сигнала и вектора подпространства шума, исходя из заданного порядка модели  $p$  (рекомендации, по выбору которой приведены [2]). При заданном порядке модели, равном  $p$ , вектора  $\vec{v}_{p+1}, \dots, \vec{v}_{N/2}$  будут относиться к подпространству шума и им будут соответствовать сингулярные числа  $\sigma_{p+1}, \dots, \sigma_{N/2}$ . Используя полученные данные, псевдоспектр можно определить следующим выражением [2]

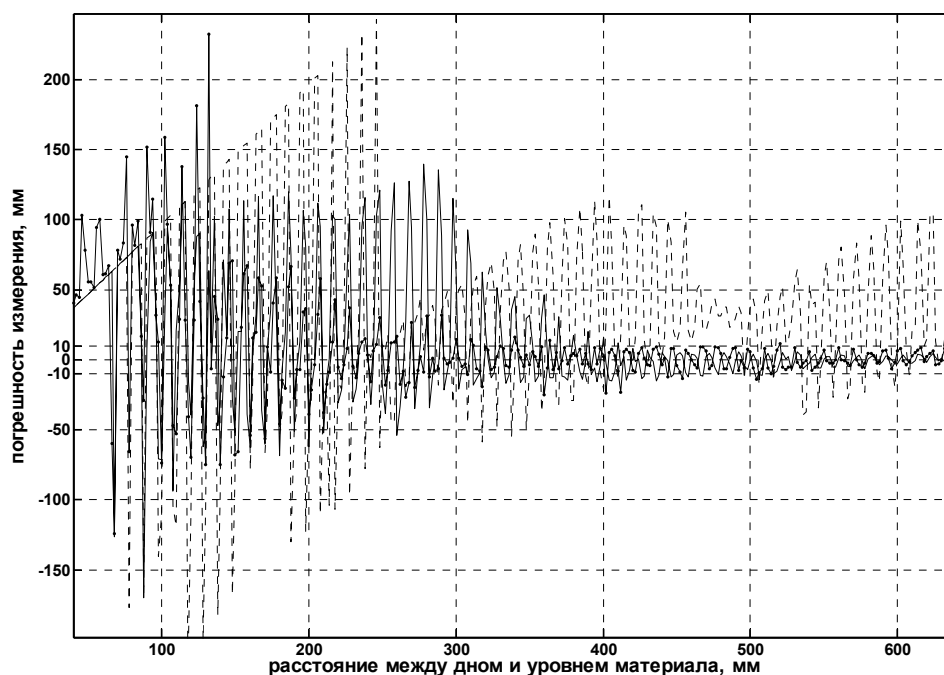
$$P_{EV}(\omega_i) = \frac{1}{\sum_{k=p+1}^{N/2} \frac{1}{\sigma_k^2} |S_k(j\omega_i)|^2},$$

где  $S_k(j\omega) = F(\vec{v}_k)$ ,  $F$ - оператор, реализующий вычисление БПФ,  $\omega_i = 2\pi i / N_0$ ,  $i = \overline{1, N_0}$ ,  $N_0$  - количество отсчетов в сигнале после добавления нулевых отсчетов для вычисления БПФ. Следует отметить, что характеристики алгоритма EV существенным образом определяются видом выбранной матрицы данных.

Алгоритм EV не имеет в псевдоспектре ложных спектральных составляющих, превышающих полезный сигнал по амплитуде (на модельных задачах при отношении сигнал-шум более 40дБ), а на практике они возникают крайне редко. Поэтому анализ псевдоспектра для нахождения спектральной составляющей, соответствующей полезному сигналу, не требуют больших дополнительных вычислительных затрат. Анализ показал возможность успешного использования этого алгоритма в режиме, когда сигнал, отраженный от дна резервуара превышает по амплитуде полезный сигнал. Такой режим измерения расстояния до уровня материала характерен при малых удалениях его от дна резервуара.

В докладе приведены результаты анализа реализованного алгоритма измерения частоты (дальности) на основе метода EV. Результаты расчетов представлены на рис.1 в виде графиков функции погрешности измерения дальности от расстояния между дном резервуара и уровнем материала. Для сравнения на рис. 1 представлены графики результатов расчетов для алгоритмов на основе методов EV, Прони и БПФ при использовании сигналов, полученных с выхода приемника дальномера БАРС-352, разработанного и выпускаемого предприятием ООО «Контакт-1» (г. Рязань). Условия, при которых получены графики, следующие: Для алгоритма измерения дальности на основе метода EV порядок модели  $p=16$ , интервал между спектральными составляющими соответствует величине  $\Delta r = 1\text{мм}$ ; Для алгоритма на основе БПФ интервал между спектральными составляющими соответствует величине  $\Delta r = 1\text{мм}$ ; Для алгоритма на основе метода Прони порядок модели равен  $p=84$ . Количество отсчетов сигнала для всех алгоритмов  $N=256$ .

Сравнивая соответствующие зависимости, полученные на рис.1 для алгоритма на основе EV метода и алгоритма на основе БПФ, можно сделать вывод о том, что алгоритм на основе EV метода имеет преимущество по сравнению с алгоритмом на основе БПФ, и оно становится более существенным с удалением уровня материала от дна. Из рис.1 видно, что на удалении уровня материала от дна на расстояние больше 0.5 м, преимущество алгоритма на основе EV метода по сравнению с алгоритмом на основе БПФ возрастает более чем на порядок за счет более высокого разрешения. Сравнивая соответствующие зависимости, приведенные на рис.1 для алгоритма на основе EV метода и алгоритма на основе метода Прони, видим, что алгоритм на основе метода Прони не уступает алгоритму на основе метода EV, а в некоторых случаях превосходит его по точностным характеристикам. В случае если в качестве матрицы данных для метода EV использовать модифицированную корреляционную матрицу [2], характер изменения погрешности для алгоритма на основе EV метода практически совпадает с характером изменения погрешности для алгоритма на основе метода наименьших квадратов Прони. Необходимо отметить, что использование метода наименьших квадратов Прони, предполагает более жесткие требования к СРЧ (в частности, необходимо уменьшить уровень паразитной амплитудной модуляции и обеспечить повышенное отношение сигнал-шум)



зависимости для алгоритмов — EV, —•— Прони, ---- БПФ

Рис.1. Погрешность измерения дальности при наличии мешающих отражений от дна резервуара.

#### Литература

1. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.-320с.
2. Марпл. – мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584с.
3. Паршин В. С., Езерский В. В. Использование алгоритмов параметрического спектрального анализа при измерении дальности с помощью радиолокационных дальномеров с ЧМ сигналом. Труды 7-Международной конференции Т1. М.: РНТОРЭС им. Попова, 2005. С.234-237.
4. Деммель Дж. Вычислительная линейная алгебра. Теория и приложения. Пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 403с.



### MEASUREMENT OF DISTANCE UP TO THE LEVEL OF THE MATERIAL IN THE TANK AT PRESENCE OF PREVENTING REFLECTIONS FROM ITS BOTTOM, EXCEEDING ON INTENSITY THE USEFUL SIGNAL

Parshin V., Bagdadyulyan A.

The Ryazan state radio engineering academy

At precision measurement of range with the help of modern radio wave range finders with continuous it is frequency - modulated (FM) radiation up to a reflecting surface of liquid environments in the closed volumes there are specific features which complicate the decision of this task. It is caused by that alongside with reflections from a surface of a material, up to which it is necessary to measure range, reflections from a bottom of the tank and elements of its design can take place. Measurement of range in modern level gauges, as a rule, is carried out in spectral area for what frequency on which there is a maximal spectral component [1] is defined. But to measure range on a maximum of a spectral component of a signal different frequencies (SDF) it is possible under condition of if amplitudes of preventing reflections do not exceed a useful signal on amplitude. Besides presence of preventing reflections results in essential distortions of a useful signal due to mutual influence of lateral petals of the spectrum calculated on positive and negative frequencies that results in sharp increase in an error of measurement of range for algorithms on the basis of classical methods of the spectral analysis [2]. Therefore for the decision of the given task it is expedient to use algorithms on the basis of the parametrical spectral analysis which allow to overcome a number of lacks of classical methods and, first of all, to increase the sanction on frequency and practically to exclude influence of lateral petals.

In work various algorithms of the parametrical spectral analysis [2-3] are investigated: a method of the least squares Prony EV, MUSIC, etc. Advantages and lacks of algorithms are marked. The opportunity of successful use of algorithm EV in a mode when the signal reflected from a bottom of the tank exceeds a useful signal on amplitude is shown. Such mode of measurement of distance up to a level of a material is characteristic at small its removals from a bottom of the tank.

In the report results of the analysis of the realized algorithm of measurement of frequency are resulted on the basis of method EV. Results of calculations are submitted as schedules of function of an error of measurement of range from distance between a bottom of the tank and a level of a material. For comparison schedules of results of

calculations for algorithms are submitted on the basis of methods EV, Prony and FFT, at use of the signals received from an output of the receiver of a range finder the BARS - 352, developed and released by enterprise "Kontakt-1" (Ryazan).

By the received results the following conclusions are made. The algorithm on basis EV of a method allows to measure more precisely range in comparison with algorithm on basis FFT, and the prize becomes more essential with removal of a level of a material from a bottom. On removal of a level of a material from a bottom on distance than 0.5 m advantage of algorithm on basis EV of a method there are more in comparison with algorithm on basis FFT grows more than by the order for the account of higher sanction. Comparison of algorithm on basis EV of a method and algorithm on the basis of method Prony has shown, that the algorithm on the basis of method Prony does not concede to algorithm on the basis of method EV. However use of algorithm on the basis of a method of the least squares Prony assumes more rigid requirements to SDF (in particular, it is necessary to reduce a level of parasitic peak modulation and to provide the raised attitude signal - noise).

#### The literature

1. Tikhonov V.I. Optimally reception of signals. - M.: Radio and communication, 1983.-320c.
2. Marpl. - ml. S.L. digital the spectral analysis and its appendices: Translation. With English - M.: the World, 1990. - 584c.
3. Parshin V.S., Yezersky V.V. Use of algorithms of the parametrical spectral analysis at measurement of range with the help of radar-tracking range finders with FM a signal. Works of 7-international conference T1. M.: RSTSREC a name Popova, 2005. - 234-237c

