

УТОЧНЕННЫЙ АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФАЗОВОЙ СТРУКТУРЫ ПРИНИМАЕМОГО РАЗНЕСЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИОННО-БАЗОВОЙ СИСТЕМОЙ СИГНАЛА

Е.С. Рощупкин

(представил д.т.н., проф. А.Ф. Маслов)

Предложен уточненный метод измерения координат источников собственного излучения в пассивной радиолокации, позволяющий снизить аппаратные затраты. Проведено исследование ошибок определения координат, получаемых при измерении. Проведена проверка работоспособности предложенного метода.

Постановка проблемы и анализ литературы. В настоящее время для определения координат источников широкополосного излучения типа активных помех нашли широкое применение разнесенные корреляционно-базовые системы (РКБС) [1, 2]. К недостаткам существующих систем (разностно-дальномерных, угломерно-разностно-дальномерных) можно отнести большие ошибки измерения дальности, растущие с увеличением расстояния до цели, и относительно низкую разрешающую способность по данной координате. Другим серьезным недостатком систем, использующих для определения дальности измерения разности хода сигналов между приемными пунктами корреляционный метод, является проблема однозначного определения дальности при излучении источником узкополосных сигналов (противокорреляционных помех). Это приводит к существенному ограничению использования информации, получаемой РКБС.

В системах пассивной локации кривизна волнового фронта (ВФ) является единственным источником информации о дальности наблюдаемого объекта. Все системы пассивной локации, полностью определяющие положение источника излучения, в той или иной форме используют сферичность ВФ поля в пределах базы системы [3].

В работе [4] была рассмотрена возможность восстановления ВФ сигнала источника собственного излучения по значениям разности хода сигналов, принимаемых выносными приемными пунктами в РКБС, с последующим измерением координат источника.

Целью данной статьи является уточнение метода определения координат источника излучения [4] за счет использования более адекватных реальной ситуации:

- алгоритма измерения разности фаз;
- функции, аппроксимирующей фазовый фронт на апертуре системы.

Постановка задачи. Пусть приемная система состоит из $(N+1)$ антенн, расположенных на одной линии. Размер базы системы L . Неподвижный точечный источник излучает сигнал на частоте f_0 из точки M (рис. 1). Относительно каждой парциальной антенны источник сигнала находится в дальней зоне. Измерение разности хода сигналов, принятых отдельными апертурами, предполагается путем отслеживания разности фаз сигналов, принятых отдельными пунктами. На вход системы поступает векторный процесс $\Delta r(\rho_i) = \|\Delta r_i\|$, $i = 0..N$. Компоненты ρ_i нам точно известны, а величины Δr_i измерены с погрешностями δ_i , так что наблюдению подлежат искаженные случайными погрешностями величины $\hat{\Delta r}_i = \Delta r_i + \delta_i$. Погрешности δ_i независимы, несмещены и нормальны со статистическими характеристиками $M[\delta_i] = 0$, $D[\delta_i] = \sigma_i^2$, где σ_0^2 соответствует дисперсия определения временного положения сигнала в опорном пункте. Предположим, что $\sigma_i^2 = \sigma^2$.

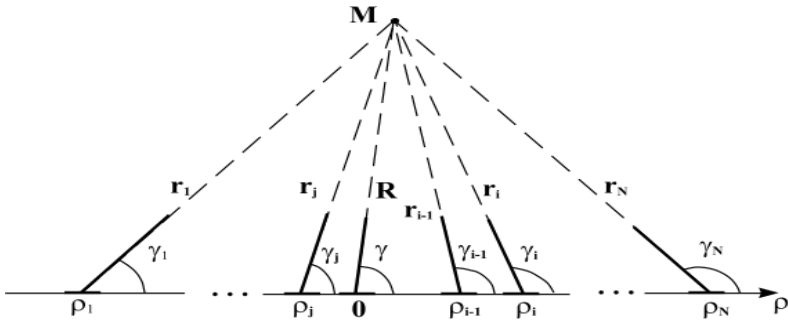


Рис. 1. Схема РКБС

Уточнение алгоритма измерения координат. В [4] в качестве аппроксимирующей функции использовались ортогональные многочлены Чебышева для неравноотстоящих точек с ненулевым свободным членом, что приводило к смещению системы отсчета координат. Произведя замену переменных:

$$x \in [-1; 1], \quad x_i = \frac{2\rho_i - \rho_N - \rho_1}{\rho_N - \rho_1}; \quad (1)$$

$$\rho \in [\rho_1; \rho_N], \quad \rho_i = \frac{\rho_1 + \rho_N}{2} + \frac{\rho_N - \rho_1}{2} \cdot x_i$$

для построения ортогональной системы полиномов для системы точек $x_1 \dots x_N$ воспользуемся следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \varphi_0(x) &\equiv 0; \quad \varphi_1(x) = x; \quad \varphi_2(x) = x^2 - ax, \quad a = \frac{\sum x_i^3}{\sum x_i^2}; \\ m = 3 \dots n; \quad \gamma_m &= -\frac{\sum x_i \varphi_{m-2}(x) \varphi_{m-1}(x)}{\sum \varphi_{m-2}(x)}; \quad \beta_m = -\frac{\sum x_i \varphi_{m-1}^2(x)}{\sum \varphi_{m-1}^2(x)}; \\ \varphi_m(x) &= (x - \beta_m) \varphi_{m-1}(x) + \gamma_m \varphi_{m-2}(x). \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда \hat{A} – вектор оценок коэффициентов полиномиального разложения сигналов по методу наименьших квадратов (МНК) однозначно находится из матричного уравнения [5]:

$$\hat{A} = C^{-1} \cdot \Phi^T \cdot \Delta \hat{r},$$

где $C = \Phi^T \Phi$; Φ – матрица ортогональных полиномов.

Оценки \hat{a}_i для коэффициентов a_i , получаемые по МНК, являются несмещенными, а вектор оценок \hat{A} представляет собой случайный нормальный n -мерный вектор с корреляционной матрицей $B_{\hat{A}} = \sigma^2 C^{-1}$.

Величины Δr_i связаны с величинами $\varphi_i(x)$ точным соотношением $\Delta r = \Phi A$. В качестве оценок для Δr_i будем брать вектор $\Delta \tilde{r} = \Phi \hat{A}$, полученный после "выравнивания" $B\Phi$, со следующими статистическими характеристиками: $M[\Delta \tilde{r}] = \Phi A = \Delta r$, $B_{\Delta \tilde{r}} = \sigma^2 \Phi C^{-1} \Phi^T$. Значение разности хода сигнала в ортогональном базисе можно записать следующим образом

$$\Delta r_i = \hat{a}_1 \varphi_1(x_i) + \hat{a}_2 \varphi_2 + \dots + \hat{a}_n \varphi_n(x_i).$$

Расписав выражения для полиномов, произведя обратную замену переменных относительно ρ_i (1) и сгруппировав подобные члены относительно соответствующих степеней ρ_i , можно записать выражение для разности хода Δr_i , выраженное через координаты приемных пунктов:

$$\Delta r_i = \hat{h}_1 \rho_i + \hat{h}_2 \rho_i^2 + \dots + \hat{h}_n \rho_i^n, \quad (3)$$

где $\hat{h}_i = k_{1i} \hat{a}_i + k_{2i} \hat{a}_{i+1} + k_{3i} \hat{a}_{i+2} + \dots$, k_{ji} – некоторые постоянные, образующиеся при группировке аппроксимирующего многочлена по степеням относительно ρ_i .

Разность хода сигналов можно записать также в виде:

$$\Delta r_i = R - \sqrt{R^2 + \rho_i^2 - 2R\rho_i \cdot \cos(\gamma)}.$$

Решая данное уравнение относительно R , получим

$$R = \frac{\rho_i^2 - \Delta \tilde{\Gamma}_1^2}{2(\rho_i \cos(\gamma) - \Delta \Gamma)}. \quad (4)$$

В [4] было показано, что при $R > \rho$ в секторе $[40^\circ; 140^\circ]$ $\cos(\gamma) \cong \tilde{h}_1$. Для разложения с использованием аппроксимирующего многочлена не выше четвертой степени выражение (4) с подстановкой (3) примет вид:

$$R = \frac{2\rho\tilde{h}_1\tilde{h}_2 + \rho^2(2\tilde{h}_1\tilde{h}_3 + \tilde{h}_2) + 2\rho^3(\tilde{h}_1\tilde{h}_4 + \tilde{h}_2\tilde{h}_3)}{2(\tilde{h}_2 + \rho\tilde{h}_3 + \rho^2\tilde{h}_2)} + \frac{\rho^4(2\tilde{h}_2\tilde{h}_4 + \tilde{h}_3) + 2\rho^5\tilde{h}_3\tilde{h}_4 + \rho^6\tilde{h}_4 + \tilde{h}_1^2 - 1}{2(\tilde{h}_2 + \rho\tilde{h}_3 + \rho^2\tilde{h}_2)}. \quad (5)$$

Подставив в данное выражение координату опорного пункта ($\rho = 0$), получим $R = -(1 - \tilde{h}_1^2)/2\tilde{h}_2$, что соответствует выражению для определения дальности в [4].

Ошибка в определении разности хода влияет на ошибку определения дальности, вычисленной по выражению (4), тем сильнее, чем больше отношение R/ρ . Следовательно, дальность источника будет измеряться более точно при ее определении по информации о разности хода в крайних выносных пунктах РКБС, а при их симметричном расположении относительно опорного вычисление усредненного значения дальности $R_{\text{ср}} = 0,5 (R_1 + R_N)$ позволит уменьшить случайную ошибку. Следует заметить, что оценки $\Delta \tilde{\Gamma}_1$ зависимы, в отличие от $\Delta \tilde{\Gamma}_1$.

Для исследования работы данного алгоритма было произведено математическое моделирование на ПЭВМ. Размер базы системы полагался $L = 20$ км, $\sigma = 3$ м, ошибки определения разности хода полагались независимыми и нормально распределенными. Моделирование производилось для РКБС, состоящей из 8 – 15 приемных пунктов. Расположение пунктов выбиралось по случайному закону. Аппроксимация осуществлялась разложением ВФ в ряд по ортогональным полиномам (2) многочленами второй и четвертой степени. Результаты моделирования для системы, состоящей из пятнадцати приемных пунктов с координатами $(-10000, -4500, -3200, -1700, -1000, -450, 0, 750, 1250, 2100, 2700, 3550, 4150, 4500, 10000)$ для дальности 100 км при аппроксимации волнового фронта полиномами второй и четвертой степени отображены на рис. 2. На рис. 2 приведены графики зависимостей смещения математических ожиданий усредненного значения дальности и углового направления от истинных координат источника излучения (а, в) и среднеквадратическое отклонение математических ожиданий (б, г).

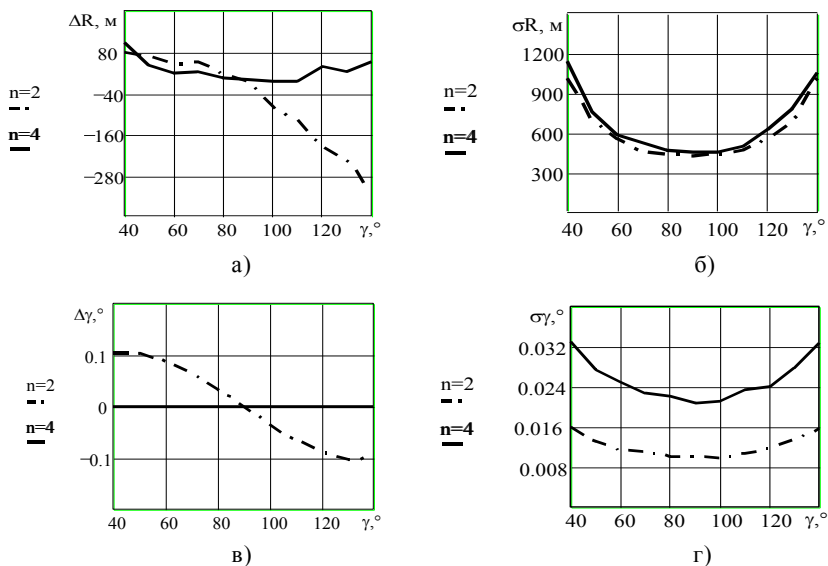


Рис. 2. Ошибки измерения координат при уточненном алгоритме

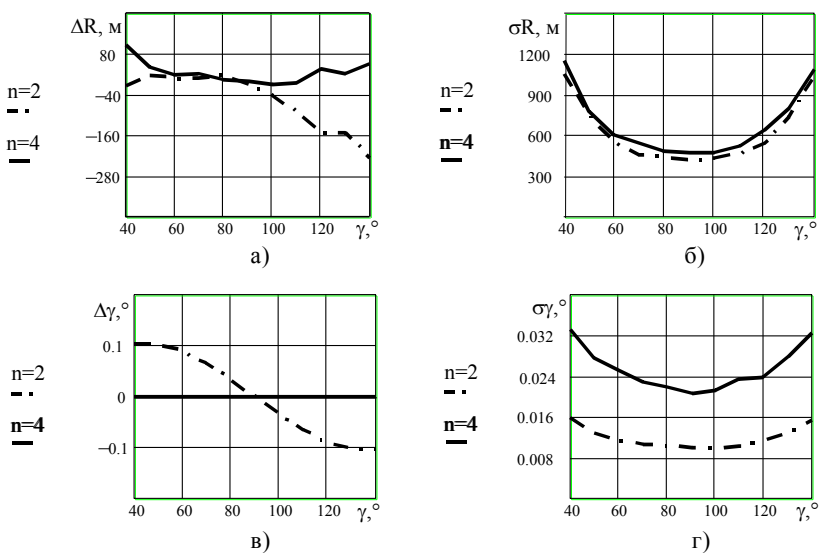


Рис. 3. Ошибки измерения координат

Для сравнения на рис. 3 приведены графики зависимостей смещения математических ожиданий усредненного значения дальности и углового направления от истинных координат источника излучения (а, в) и среднеквадратическое отклонение математических ожиданий (б, г) при аппроксимации ВФ на апертуре системы по предложенному в [4] методу.

Из анализа графиков можно сделать вывод, что при разложении ВФ в ряд по ортогональным многочленам (2) происходит незначительное улучшение точности измерений, несмотря на уменьшение числа определяемых коэффициентов полиномиального разложения. Это вызвано тем, что при использовании данного разложения, в отличие от предложенного в [4], аппроксимирующая функция проходит точно через опорный пункт, однако при этом несколько возрастают дисперсии оценок разности хода $\Delta \tilde{\tau}$ между выносными и опорным пунктами. Выигрыш в точности за счет уменьшения в выборке ограниченного объема числа измеряемых параметров при этом уменьшается.

Выводы. 1. Из приведенных результатов следует, что уточненный метод измерения координат путем восстановления структуры фазового фронта на апертуре РКБС позволяет обеспечить приемлемую точность измерения.

2. Для фазовых измерителей целесообразно использовать уточненный алгоритм, основанный на разложении фазового фронта в ряд по ортогональным многочленам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
3. Кремер И.Я., Кремер А.И., Петров В.М., Понькин В.А., Потапов Н.А. Пространственно-временная обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
4. Маслов А.Ф., Роцупкин Е.С., Колодей О.П. Ошибки измерения координат источника излучения при обработке пространственной фазовой структуры принимаемого разнесенной корреляционно-базовой системой сигнала // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ. – 2003. – Вып. 1. – С. 125 – 138.
5. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. – 337 с.

Поступила 25.03.2003

РОЩУПКИН Евгений Сергеевич, адъюнкт научного центра при ХВУ. В 1998 году окончил ХВУ. Область научных интересов – усовершенствование способов измерения координат в пассивных многопозиционных радиотехнических системах.