

Алгоритм траекторного сопровождения целей, движущихся по нелинейным траекториям, в бистатической просветной радиолокационной системе

В.Н. Буров, А.В. Мякинников

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24. (redvillage@mail.ru)

В данной работе рассматривается алгоритм сопровождения целей, движущихся по нелинейным траекториям, в бистатической просветной радиолокационной системе. Оценивается точность определения координат.

The algorithm of tracking of the targets moving along the non-linear trajectories in bistatic forward scattering radar system is considered. The accuracy of target tracking is estimated.

Введение

В радиолокационных системах (РЛС) с обнаружением «на просвет» передатчик и приемник разнесены в пространстве на расстояние d , называемое базой системы. Обнаружение и сопровождение целей происходит в узкой области, вытянутой вдоль линии базы, соединяющей передающую и приемную позиции. В этой области эффективная площадь рассеяния (ЭПР) целей резко возрастает благодаря действию так называемого просветного эффекта.

В работах [1-5] были рассмотрены способы определения координат на основе метода максимального правдоподобия для случая движения цели по линейной траектории. В частности, были рассмотрены методы кусочно-линейной аппроксимации траекторий, имеющих незначительную кривизну (метод скользящего окна). Эти методы не позволяли сопровождать с приемлемой точностью существенно нелинейные траектории, либо имели очень большие ошибки определения координат. Алгоритм, рассмотренный в данной работе, разработан для сопровождения нелинейных траекторий целей, движущихся со значительным ускорением.

В данной работе будем рассматривать движение цели по траектории, описываемой кривой второго порядка в трехмерном пространстве. Пример траектории цели показан на рисунке 1.

Для расширения зоны обнаружения целей одна или обе позиции просветной системы могут располагаться на подвижных носителях – самолетах, вертолетах, искусственных спутниках Земли. Как показано в [3], расположение позиций на подвижных носителях, траектории движения которых точно известны, не влияет на точность оценки траекторных параметров цели. Кроме того, появляются дополнительные функциональные возможности системы, связанные, например, с возможностью определения координат объектов, неподвижных относительно поверхности Земли [3].

Метод максимального правдоподобия и потенциальная точность

В просветной РЛС с непрерывным зондирующим сигналом в качестве измеряемых первичных параметров используются частота Доплера f_D , азимут цели α и угол места цели β . Последовательность n измерений первичных параметров образуют вектор первичных измерений $\mathbf{z}_n = [f_{D1}^2, \alpha_1, \beta_1, f_{D2}^2, \alpha_2, \beta_2, \dots, f_{Dn}^2, \alpha_n, \beta_n]^T$.

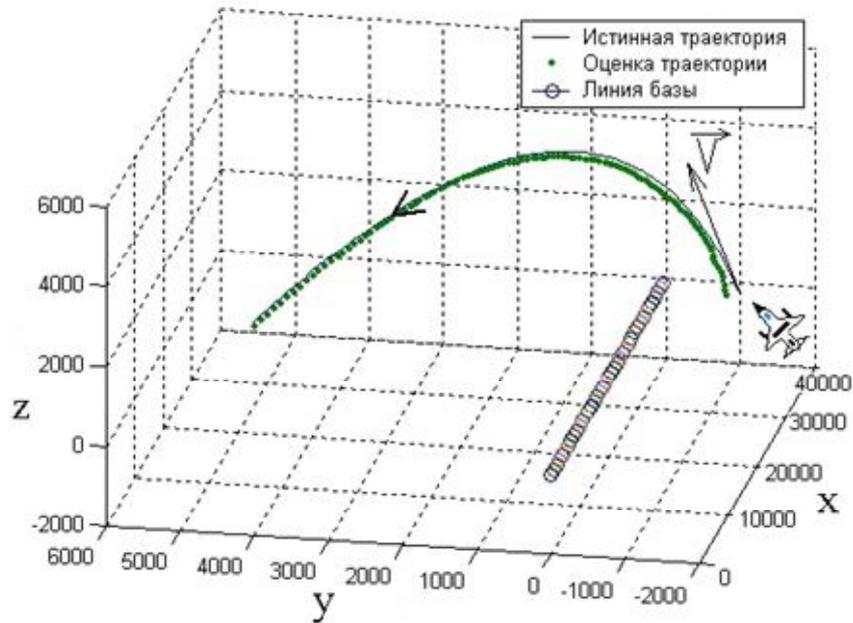


Рис. 1. Параболическое движение в пространстве

Для определения координат целей используется метод максимального правдоподобия. Оценка вектора траекторных параметров \mathbf{x}_n , оптимальная по критерию максимального правдоподобия, находится из условия максимизации условной плотности распределения вероятности вектора первичных измерений $p(\mathbf{z}_n | \mathbf{x}_n)$. Будем полагать, что измерения доплеровской частоты, азимута и угла места цели независимы между собой и для различных моментов времени и распределены по нормальному закону. В этом случае условная плотность вероятности вектора первичных измерений имеет вид:

$$p(\mathbf{z}_n | \mathbf{x}_n) = \frac{1}{(2\pi)^{3n/2}} \left(\frac{1}{\sigma_f} \right)^n \prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(f_{Di} - f_{Di}(\mathbf{x}_n))^2}{2\sigma_f^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{\sigma_\alpha} \right)^n \prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(\alpha_i - \alpha_i(\mathbf{x}_n))^2}{2\sigma_\alpha^2} \right) \times \left(\frac{1}{\sigma_\beta} \right)^n \prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(\beta_i - \beta_i(\mathbf{x}_n))^2}{2\sigma_\beta^2} \right) \quad (1)$$

где σ_f , σ_α , σ_β – среднеквадратические отклонения ошибок измерения первичных параметров, полагаемые одинаковыми для всех моментов времени t_i . Потенциальная точность определяется информационной матрицей Фишера [6], выражения для элементов которой при принятых допущениях записываются в виде:

$$J_{lk}(\mathbf{x}_n) = \frac{1}{\sigma_f^2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f_{Di}(\mathbf{x}_n)}{\partial x_l} \cdot \frac{\partial f_{Di}(\mathbf{x}_n)}{\partial x_k} \right] + \frac{1}{\sigma_\alpha^2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \alpha_i(\mathbf{x}_n)}{\partial x_l} \cdot \frac{\partial \alpha_i(\mathbf{x}_n)}{\partial x_k} \right] + \frac{1}{\sigma_\beta^2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \beta_i(\mathbf{x}_n)}{\partial x_l} \cdot \frac{\partial \beta_i(\mathbf{x}_n)}{\partial x_k} \right], \quad (2)$$

где $x_l, x_k, (l, k = \overline{1,9})$ – элементы вектора \mathbf{x}_n ($x_1 = x_n; x_2 = y_n; x_3 = z_n; x_4 = V_x; x_5 = V_y; x_6 = V_z; x_7 = a_x; x_8 = a_y; x_9 = a_z$), $f_{Di}(\mathbf{x}_n)$, $\alpha_i(\mathbf{x}_n)$, $\beta_i(\mathbf{x}_n)$ – функции, связывающие вектор измерений и вектор параметров траектории.

Графики зависимости нормированных среднеквадратических отклонений (СКО) ошибок определения некоторых траекторных параметров от нормированной к длине линии базы координаты y (рисунок 1), соответствующие потенциальной точности, изображены сплошной линией на рисунках 2-4.

Итерационный алгоритм

Решение задачи максимизации условной плотности распределения вероятности вектора первичных измерений $p(\mathbf{z}_n | \mathbf{x}_n)$ может быть найдено численными методами. В частности, для вычисления оценки вектора траекторных параметров можно использовать итерационный алгоритм Гаусса-Ньютона[7], который имеет вид:

$$\hat{\mathbf{x}}_n^{j+1} = \hat{\mathbf{x}}_n^j + k(\mathbf{H}_n^T \mathbf{G}_n \mathbf{H}_n)^{-1} \mathbf{H}_n^T \mathbf{G}_n [\mathbf{z}_n - \mathbf{h}_n(\hat{\mathbf{x}}_n^j)] \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{x}}_n^{j+1}$ – новая оценка вектора траекторных параметров цели на $(j+1)$ -м интервале времени, $\mathbf{H}_n = \partial \mathbf{h}_n(\mathbf{x}_n) / \partial \mathbf{x}_n \Big|_{\mathbf{x}_n = \hat{\mathbf{x}}_n^j}$ – матрица производных, $\mathbf{h}_n(\mathbf{x}_n^j)$ – нелинейная функция, определяющая зависимость истинных значений первичных параметров от истинных значений вектора траекторных параметров \mathbf{x}_n^j , \mathbf{G}_n – матрица, обратная корреляционной матрице ошибок измерения первичных параметров, k – параметр, определяющий скорость сходимости алгоритма. При условии независимости ошибок измерений первичных параметров матрица \mathbf{G}_n имеет диагональный вид. При этом значения СКО ошибок измерения первичных параметров могут быть априори известны или оцениваться в процессе сопровождения цели по первичным параметрам.

Ключевым моментом, необходимым для работы итерационного алгоритма (1.3), является получение начального приближения. Для этого может использоваться так называемый угломерно-спектральный алгоритм, суть которого заключается в следующем.

По вектору первичных измерений z_n аппроксимируются оценки параметров $\hat{\alpha}_1(\mathbf{x}_n), \hat{\beta}_1(\mathbf{x}_n)$ линейными зависимостями. Использование линейной аппроксимации при нелинейном характере траектории оправдано тем, что данный алгоритм используется лишь на начальном участке траектории. Далее, зависимость $\hat{\alpha}_1(\mathbf{x}_n)$ экстраполируется на момент пролета цели над линией базы и определяется оценка этого момента t_{CR} . Вычисляется экстраполированное значение $\hat{f}_D^2(t_{CR})$ на момент времени t_{CR} . Находится оценка суммарной дальности передатчик-цель-приемник по следующим формулам [7]:

$$\hat{L}(t) = d + \lambda \int_t^{t_{CR}} \bar{f}_D(t) dt, \quad t \leq t_{CR}, \quad (4)$$

$$\hat{L}(t) = d - \lambda \int_{t_{CR}}^t \bar{f}_D(t) dt, \quad t > t_{CR}.$$

где, d – длина линии базы, λ – длина волны, $\bar{f}_D(t) = \hat{f}_D^2(t) - \hat{f}_D^2(t_{CR})$.

Оценки текущих координат цели определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \frac{(\hat{L}^2 - d^2) \cos(\hat{\beta}) \cos(\hat{\alpha})}{2(\hat{L} - d \cos(\hat{\alpha}) \cos(\hat{\beta}))} \\ \hat{y} &= \frac{(\hat{L}^2 - d^2) \cos(\hat{\beta}) \sin(\hat{\alpha})}{2(\hat{L} - d \cos(\hat{\alpha}) \cos(\hat{\beta}))} \\ \hat{z} &= \frac{(\hat{L}^2 - d^2) \sin(\hat{\beta})}{2(\hat{L} - d \cos(\hat{\alpha}) \cos(\hat{\beta}))} \end{aligned} \quad (5)$$

Оценка скоростей определяется как разность соответствующих текущих и предыдущих координат, отнесенные к интервалу дискретизации отсчетов.

Результаты математического моделирования

Работа предложенного алгоритма исследовалась методом математического моделирования. В процессе моделирования полагали, что значения параметров системы имеют следующие значения: длина базы $d = 40000$ м, СКО ошибок измерения первичных параметров $\sigma_f = 0.5$ Гц, $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 0.5^\circ$, длина волны $\lambda = 0.5$ м, интервал первичных измерений $T = 0.5$ с, модуль вектора ускорения цели $A = 10.25$ м/с². Траектория цели задавалась в виде начальных значений параметров движения: $x_0 = 10000$ м, $y_0 = -1000$ м, $z_0 = -2000$ м, $V_{x0} = 150$ м/с, $V_{y0} = 20$ м/с, $V_{z0} = 300$ м/с. Результаты моделирования изображены на рисунках 2-4. На всех рисунках по оси абсцисс отложена нормированная к линии базы координата y (рисунок 1). По оси ординат отложены нормированные к длине линии базы СКО определения соответствующих параметров. На рисунках 3,4 V – модуль вектора скорости цели, A – модуль вектора ускорения.

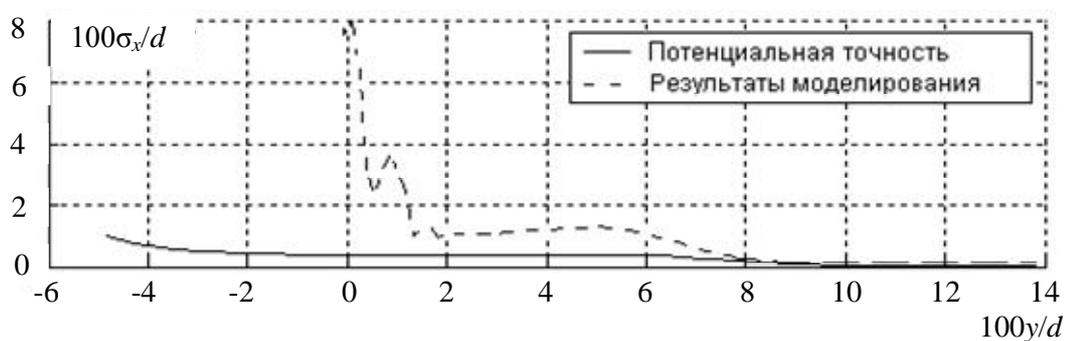


Рис. 2.

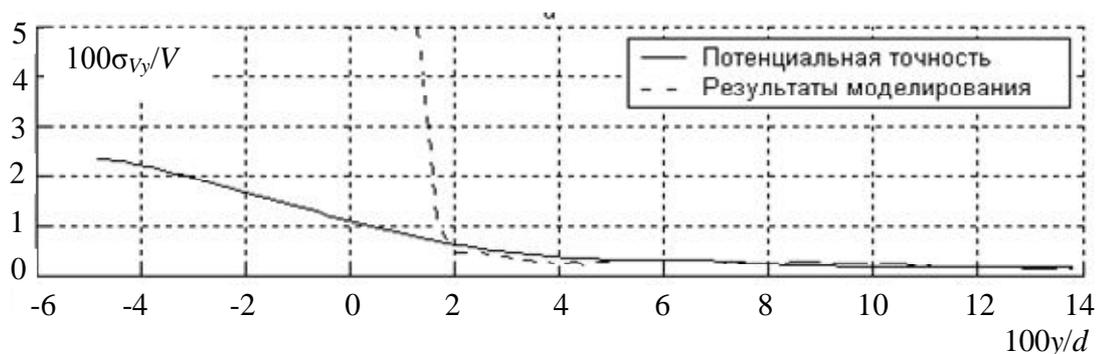


Рис. 3.

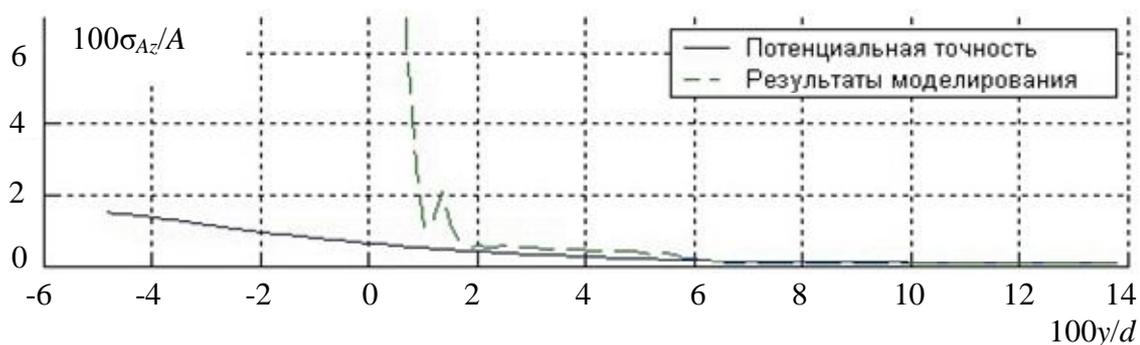


Рис. 4.

Из рассмотрения графиков на рисунках 2-4 видно, что точность сопровождения целей, движущихся по нелинейным траекториям, достигнутая при использовании предложенного алгоритма, стремится к потенциально достижимой точности оценивания методом максимального правдоподобия.

Заключение

К достоинствам описанного алгоритма можно отнести его сходимость при любом значении кривизны траекторий второго порядка. По сравнению с предыдущими методами, использующими кусочно-линейную аппроксимацию при нелинейном движении цели, СКО определения координат вышеописанного метода уменьшаются со временем наблюдения.

Литература

1. А.Б. Бляхман, А.В. Мякинков, А.Г. Рындык. Измерение координат целей в трехкоординатных бистатических РЛС с обнаружением “на просвет”. // Радиотехника и электроника. №4, 2006. – С.422-427.
2. Blyakhman, A. V. Algorithm of target tracking for three-dimensional bistatic forward scattering radar /A. V. Blyakhman, A. V. Myakinkov, A. G. Ryndyk // Proc. IV International Radar Symposium. – Warsaw, Poland, 2004. – P. 309-324.
3. А.Б. Бляхман, А.В. Мякинков, А.Г. Огурцов, А.Г. Рындык. Определение координат целей в просветных радиолокационных системах с подвижными позициями. // Радиотехника и электроника. № 3, 2008, – С. 327-332.
4. А.Г. Рындык, С.Б. Сидоров, А.Б. Бляхман, Ф.Н. Ковалев. Точность определения координат методом максимального правдоподобия при локации “на просвет”// Радиотехника и электроника, 1999, том 44, N12 с. 1436 - 1440.
5. Willis, N. J. Bistatic radar. — Technology Service Corporation, 1995. — 345 с.
6. Сейдж, Э., Мелс, Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. Пер . с англ . под ред . проф . Б. Р. Левина. М.: Связь , 1976.
7. Cherniakov, M. Bistatic Radar: Emerging Technology / edited by Mikhail Cherniakov. – John Wiley & Sons, Ltd., 2008.