

из рессорно-пружинной стали 50ХГФА в пределах от 790 до 910 °С не оказывает заметного влияния на результаты измерений.

1. Мельгуй, М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М.А. Мельгуй – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.

2. Михеев, М.Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов – М.: Наука, 1993. – 252 с.
3. Матюк, В.Ф. Импульсный магнитный анализатор ИМА-6 / В.Ф. Матюк, В.А. Бурак, А.А. Осипов, Д.А. Пинчуков // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 62–74.

УДК 621.396.96

ОЦЕНИВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ЦЕЛЕЙ В ПРОСВЕТНОЙ РЛС ПРИ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Буров В.Н., Мякинников А.В.

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева
Нижний Новгород, Российская Федерация*

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

В работе [1] был рассмотрен алгоритм для случая движения цели по криволинейной траектории при использовании независимых первичных измерений. В ряде случаев цель в просветной РЛС может наблюдаться лишь в узкой зоне обнаружения, имеющей угловой размер порядка нескольких градусов. Для таких ситуаций в [2] уже был рассмотрен метод повышения точности, основанный на формировании дополнительных коррелированных измерений, однако оценка точности определения координат целей производилась только методом математического моделирования. Представляет интерес теоретический анализ точности оценивания траекторных параметров, полученных при коррелированных первичных измерениях.

В просветной РЛС с непрерывным квази-гармоническим 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 образует вектор первичных измерений

$$\mathbf{z}_n = [f_{d1}, \alpha_1, \beta_1, f_{d2}, \alpha_2, \beta_2, \dots, f_{dn}, \alpha_n, \beta_n]^T$$
, где верхним символом “^” обозначены результаты измерений; “T” – символ транспонирования. При движении цели по криволинейной траектории вектор траекторных параметров имеет вид

$$\mathbf{x}_n = [x_n, y_n, z_n, v_{xn}, v_{yn}, v_{zn}, a_{xn}, a_{yn}, a_{zn}]^T$$
, где x_n, y_n, z_n – текущие координаты цели, v_{xn}, v_{yn}, v_{zn} – текущие координатные проекции скорости цели v , a_{xn}, a_{yn}, a_{zn} – координатные проекции ускорения

цели \mathbf{a} . Задача траекторного сопровождения заключается в нахождении оценки $\hat{\mathbf{x}}_n$ вектора траекторных параметров на основе обработки вектора первичных измерений \mathbf{z}_n . В качестве алгоритма траекторной обработки может применяться итерационный алгоритм Гаусса-Ньютона [3, 4]

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

где \mathbf{x}_n^{j+1} – уточненная оценка вектора траекторных параметров цели, \mathbf{x}_n^j – начальное приближение, $\mathbf{H}_n = \partial \mathbf{h}_n(\mathbf{x}_n) / \partial \mathbf{x}_n$ – матрица производных при $\mathbf{x}_n = \mathbf{x}_n^j$, k – параметр, определяющий скорость сходимости алгоритма, $\mathbf{G}_n = \mathbf{R}_e^{-1}$. При использовании коррелированных первичных измерений матрица \mathbf{G}_n имеет недиагональный вид.

Одной из задач, решаемых просветными РЛС, является обнаружение малоразмерных целей (например, беспилотных летательных аппаратов). Для обеспечения высокой вероятности обнаружения таких целей необходимо увеличивать интервал накопления сигнала. Обнаружение и сопровождение целей в просветной РЛС происходит в узком угловом секторе, ширина которого определяется действием просветного эффекта. Поэтому число независимых измерений первичных параметров может оказаться недостаточным для обеспечения требуемой точности определения координат цели. В некоторых случаях число первичных измерений может оказаться недостаточным даже для сходимости итерационного алгоритма (1). Для преодоления указанных трудностей предлагается производить измерение первичных параметров с интервалом T_n , значительно меньшим, чем интервал накопления сигнала T_n . При этом соседние интервалы времени, в течение которых происходит накопление сигнала, его обнаружение и измерение первичных параметров, перекрываются.

Потенциальная точность предложенного алгоритма определяется как нижняя граница неравенства Рао-Крамера [5] и имеет вид (2):

$$D_x = \text{diag} \left((H_n^T G_n H_n)^{-1} \right) \quad (2)$$

где $D_x = [\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_{vx}^2, \sigma_{vy}^2, \sigma_{vz}^2, \sigma_{ax}^2, \sigma_{ay}^2, \sigma_{az}^2]^T$.

Работа предложенного алгоритма исследовалась методом математического моделирования с параметрами: длина базы $b = 100$ км, первичные измерения распределены по нормальному закону, $\sigma_f = 0,01$ Гц, $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 0,05^\circ$, длина волны $\lambda = 0,5$ м, $T_n = 6$ с, $T_n = 0,5$ с, число независимых и коррелированных первичных измерений равно 10 и 120 соответственно. В момент обнаружения цели в области просветного эффекта вектор траекторных параметров цели имеет вид $x_0 = [50\text{км}; -1,7\text{км}; -0,8\text{км}; 50\text{м/с}; 50\text{м/с}; 150\text{м/с}; 2\text{м/с}^2; 1\text{м/с}^2; -5\text{м/с}^2]^T$. Модуль вектора полного постоянного ускорения цели $|a| = 5,47$ м/с². Приемная позиция имеет координаты (0;0;0), км, а передающая позиция (100;0;0), км. Статистический анализ точности траекторного сопровождения проводился по 100 независимым реализациям.

Пример построенной траектории цели приведен на рис. 1, на котором кривая 1 – истинная траектория (сплошная кривая), кривая 2 – оценка траектории, полученная при учете коэффициента корреляции первичных измерений (штриховая кривая), кривая 3 – оценка траектории без учета корреляции (пунктирная кривая), прямая 4 – линия базы (штриховая линия).

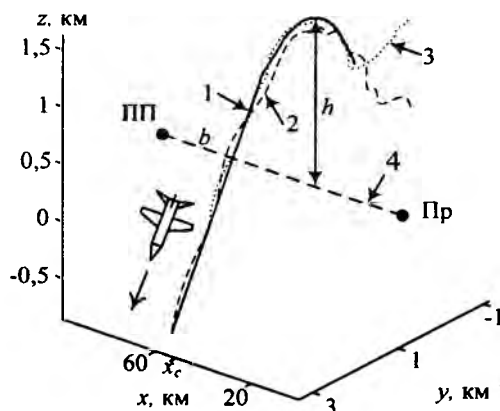


Рисунок 1 – Траекторный анализ

На рис. 2 показан график зависимости нормированного к длине базы СКО ошибки оценивания координаты x от нормированной к длине базы координаты y , где кривая 1 – потенциальная точность, рассчитанная для случая независимых первичных измерений, кривая 2 – потенциальная точность при коррелированных первичных измерениях, кривая 3 – оценка СКО ошибки оценивания при учете коэффициента корреляции первичных измерений в итерационном алгоритме, кривая 4 – оценка СКО ошибки оценивания без учета коэффициента корреляции.

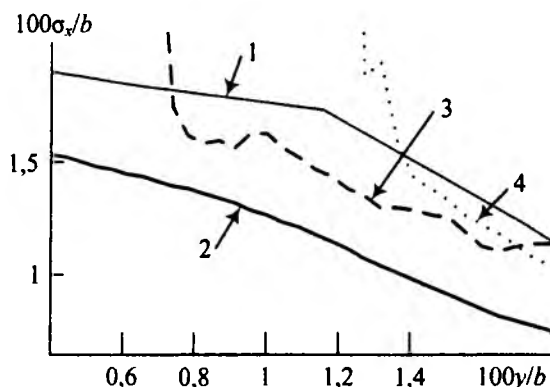


Рисунок 2 – Сравнение СКО ошибок координаты x

Метод формирования дополнительных коррелированных измерений дает два преимущества: увеличение скорости сходимости итерационного алгоритма и повышение точности сопровождения целей по сравнению со случаем использования независимых измерений. Из теоретического сравнения потенциальных точностей следует, что повышение точности по сравнению со случаем использования независимых измерений является существенным только в том случае, когда число независимых измерений мало (меньше 15) и добавление коррелированных измерений увеличивает их общее число в несколько раз. Если цель наблюдается на интервале времени, достаточном для получения большого числа независимых измерений первичных параметров (более 30), то добавление коррелированных измерений дает незначительное улучшение потенциальной точности оценивания по сравнению со случаем, когда измерения независимы.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0061 от «12» февраля 2013 года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

1. Буров В.Н., Мякинников А.В. Алгоритм траекторного сопровождения целей, движущихся по криволинейным траекториям, в бистатической просветной радиолокационной системе // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 6. С. 88–94.
2. Буров В.Н., Мякинников А.В. Повышение точности сопровождения целей, движущихся по криволинейным траекториям, при коррелированных первичных измерениях в бистатической просветной радиолокационной системе // Сборник докладов XVII Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь" – НПФ «САКВОЕЕ», Воронеж, 12 – 14 апреля, 2011. том 3, С.1702–1708.
3. 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.