

УДК 621.396.96

ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКЕ

В.А. АПОРОВИЧ, Т.В. ПРОКОФЬЕВА, А.В. ШЕВЧЕНКО

*НИИ средств автоматизации
пр. Независимости, 117, Минск, 220600, Беларусь*

Поступила в редакцию 21 августа 2008

Проведен теоретический расчет ковариационных моментов и коэффициентов взаимной корреляции координат воздушного объекта для динамической юстировки. Полученные величины сравниваются с результатами моделирования.

Ключевые слова: юстировка, динамическая юстировка, ковариационные моменты.

Введение

Предложенный в [1] алгоритм динамической юстировки (ДЮ) обеспечивает ее проведение при взаимодействии с третичной обработкой радиолокационной информации (ТОРЛИ). В общем случае, при проведении ТОРЛИ необходимо знать значения ковариационных моментов (КМ) для входной информации. Так как при ДЮ происходит перерасчет значений координат, то неизбежно меняются и значения КМ. Поэтому встает задача оценить, как меняются точностные характеристики радиолокационной информации — КМ — при ДЮ.

Теоретический анализ

Пусть в момент времени t_n на вход алгоритма ДЮ от источника с номером j поступают коррелированные значения координат $X_n^{(j)}$, $Z_n^{(j)}$ с КМ $K_{XZn}^{(j)}$. Найдем зависимость для расчета КМ $\tilde{K}_{XZn}^{(j)}$ усредненных значений координат $\tilde{X}_n^{(j)}$, $\tilde{Z}_n^{(j)}$.

В соответствии с формулой расчета коэффициента экспоненциального сглаживания, применяемой при ДЮ [1], рассчитаем значения коэффициентов $\xi_X^{(j)}$, $\xi_Z^{(j)}$. Ошибку усреднения для j -го источника в n -й момент времени можно представить в виде суммы динамической составляющей и случайной составляющей ошибки:

$$\delta\tilde{X}_n^{(j)} = \delta\tilde{X}_{dyn}^{(j)} + \delta\tilde{X}_{rand}^{(j)}; \quad (1)$$

$$\delta\tilde{Z}_n^{(j)} = \delta\tilde{Z}_{dyn}^{(j)} + \delta\tilde{Z}_{rand}^{(j)}. \quad (2)$$

В соответствии с формулой расчета динамической составляющей ошибки усреднения [1] при допущении, что смещенные трассы всех источников проходят параллельно друг другу, при $\xi_X, \xi_Z < 1$ с увеличением n динамическая ошибка стремится к нулю.

КМ для случайных величин α, β рассчитывается по формуле:

$$K_{\alpha\beta} = M((\alpha - M(\alpha))(\beta - M(\beta))) = M(\alpha\beta) - M(\alpha)M(\beta), \quad (3)$$

где $M(x)$ — математическое ожидание случайной величины x .

Возьмем в качестве α и β $\delta\tilde{X}_n^{(j)}$ и $\delta\tilde{Z}_n^{(j)}$:

$$\begin{aligned} \tilde{K}0_{XZn}^{(j)} = M(\delta\tilde{X}_n^{(j)}\delta\tilde{Z}_n^{(j)}) - M(\delta\tilde{X}_n^{(j)})M(\delta\tilde{Z}_n^{(j)}) = M \left(\delta\tilde{X}_{dyn}^{(j)} + \delta\tilde{X}_{rand}^{(j)} \right) \left(\delta\tilde{Z}_{dyn}^{(j)} + \delta\tilde{Z}_{rand}^{(j)} \right) - \\ - M \left(\delta\tilde{X}_{dyn}^{(j)} + \delta\tilde{X}_{rand}^{(j)} \right) \cdot M \left(\delta\tilde{Z}_{dyn}^{(j)} + \delta\tilde{Z}_{rand}^{(j)} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

так как динамическая ошибка при увеличении n стремится к нулю, $\tilde{K}0_{XZn}^{(j)}$ будет стремиться к значению

$$\tilde{K}_{XZn}^{(j)} = M(\delta\tilde{X}_{rand}^{(j)}\delta\tilde{Z}_{rand}^{(j)}) - M(\delta\tilde{X}_{rand}^{(j)})M(\delta\tilde{Z}_{rand}^{(j)}),$$

по условию [1] математические ожидания случайных ошибок равны нулю, следовательно,

$$\tilde{K}_{XZn}^{(j)} = M(\delta\tilde{X}_{rand}^{(j)}\delta\tilde{Z}_{rand}^{(j)}) \quad (5)$$

Подставляя выражение для расчета случайной составляющей ошибки усреднения [1] в качестве $\delta\tilde{X}_{rand}^{(j)}$ и аналогичное выражение для Z в качестве $\delta\tilde{Z}_{rand}^{(j)}$, после преобразований получим

$$\begin{aligned} \tilde{K}_{XZ}^{(j)} = \frac{1}{m^2} \left(\frac{1 - \xi_X^{(j)} \quad 1 - \xi_Z^{(j)}}{1 - \xi_X^{(j)} \xi_Z^{(j)}} \sum_{k=1}^m K_{XZ}^{(k)} + \left(\frac{1 - \xi_X^{(j)} \quad 1 - \xi_Z^{(j)}}{1 - \xi_X^{(j)} \xi_Z^{(j)}} \right)^2 m - 1 \right) \xi_X^{(j)} \xi_Z^{(j)} - 1 + \\ + 1 + \xi_X^{(j)} \quad m - 1 \quad 1 + \xi_Z^{(j)} \quad m - 1 \quad K_{XZ}^{(j)} \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты моделирования

Была рассмотрена следующая модель: объект двигался равномерно и прямолинейно со скоростью 500 м/с; составляющая скорости по оси X была равна 300 м/с, составляющая скорости по оси Z была равна 400 м/с. Объект сопровождался тремя источниками; смещение координат объекта между первым и вторым источниками составляло 1000 м по оси X и 1000 м по оси Z , смещение между первым и третьим источниками составляло 1400 м по оси X и 2000 м по оси Z . Случайное среднеквадратическое отклонение (СКО) координат X, Z составляло соответственно 125 и 500 м для первого источника, 1000 и 250 м для второго источника, 3000 и 2000 м для третьего источника. Для оценки результатов усреднения от каждого источника накапливалось 10000 отсчетов.

Рассчитанный по формуле (6) КМ $\tilde{K}_{XZ}^{(j)}$ сравнивался с оцененным по результатам усреднения КМ $\tilde{K}s_{XZ}^{(j)}$, который рассчитывался по формуле:

$$\tilde{K}s_{XZ}^{(j)} = \frac{\sum_{n=n0}^N (\tilde{X}_n^{(j)} - Xce_n) \cdot (\tilde{Z}_n^{(j)} - Zce_n)}{N - n0 + 1}, \quad (7)$$

где N — число отсчетов; $\tilde{X}_n^{(j)}, \tilde{Z}_n^{(j)}$ — усредненные значения координат X, Z от j -го источника на n -ом отсчете; Xce_n, Zce_n — смещенные значения усредненных координат на n -м отсчете.

Для уменьшения влияния динамической ошибки усреднения на результат оценки расчет КМ $\tilde{K}s_{XZ}^{(j)}$ начинался с отсчета с номером $n0$; $n0$ принималось равным 100.

В первом случае для каждого из трех источников задавались некоррелированные ошибки по координатам X, Z ; как видно из формулы (6), ошибки усредненных значений координат X, Z также будут некоррелированными: $\tilde{K}_{XZ}^{(j)} = 0$; значения оцененного КМ $\tilde{K}s_{XZ}^{(j)}$ получились равными 1477, 1235 и 145 м².

Во втором случае для каждого из трех источников задавались ошибки по координатам X, Z с коэффициентом корреляции 0,5. Результаты расчета и сравнения корреляционных моментов усредненных значений координат приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета и сравнения корреляционных моментов

| Параметр | Номер источника j | | |
|--|---------------------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Рассчитанный с учетом (6) КМ $\tilde{K}_{XZ}^{(j)}$, м ² | 41179 | 95680 | 223749 |
| Оцененный по результатам моделирования КМ $\tilde{K}_{s_{XZ}}^{(j)}$, м ² | 41224 | 94443 | 229392 |
| Абсолютная погрешность оценивания КМ $\Delta\tilde{K}_{XZ}^{(j)} = \tilde{K}_{XZ}^{(j)} - \tilde{K}_{s_{XZ}}^{(j)} $, м ² | 45 | 1237 | 5642 |
| Относительная погрешность оценивания КМ $\delta\tilde{K}_{XZ}^{(j)} = \tilde{K}_{XZ}^{(j)} - \tilde{K}_{s_{XZ}}^{(j)} / \tilde{K}_{XZ}^{(j)}$, в процентах | 0,1 | 1,3 | 2,5 |
| Рассчитанный с учетом формулы (6) коэффициент корреляции $\tilde{\rho}_{XZ}^{(j)} = \tilde{K}_{XZ}^{(j)} / \tilde{\sigma}_X^{(j)} \tilde{\sigma}_Z^{(j)}$ | 0,39956 | 0,39739 | 0,4582 |
| Оцененный по результатам моделирования коэффициент корреляции $\tilde{\rho}_{s_{XZ}}^{(j)} = \tilde{K}_{s_{XZ}}^{(j)} / \tilde{\sigma}_{s_X}^{(j)} \tilde{\sigma}_{s_Z}^{(j)}$ | 0,38249 | 0,39897 | 0,46974 |
| Абсолютная погрешность оценивания коэффициента корреляции $\Delta\tilde{\rho}_{XZ}^{(j)} = \tilde{\rho}_{XZ}^{(j)} - \tilde{\rho}_{s_{XZ}}^{(j)} $ | 0,01707 | 0,00159 | 0,01154 |
| Относительная погрешность оценивания коэффициента корреляции $\delta\tilde{\rho}_{XZ}^{(j)} = \tilde{\rho}_{XZ}^{(j)} - \tilde{\rho}_{s_{XZ}}^{(j)} / \tilde{\rho}_{XZ}^{(j)}$, в процентах | 4,3 | 0,4 | 2,5 |

В третьем случае для первого источника коэффициент корреляции ошибок по координатам X, Z задавался равным 0,1, для второго источника — минус 0,9, для третьего — 0,7. Результаты расчета и сравнения корреляционных моментов усредненных значений координат приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета и сравнения корреляционных моментов

| Параметр | Номер источника j | | |
|--|---------------------|----------|---------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Рассчитанный с учетом (6) КМ $\tilde{K}_{XZ}^{(j)}$, м ² | 23042 | -120847 | 244184 |
| Оцененный по результатам моделирования КМ $\tilde{K}_{s_{XZ}}^{(j)}$, м ² | 25772 | -116370 | 248869 |
| Абсолютная погрешность оценивания КМ $\Delta\tilde{K}_{XZ}^{(j)} = \tilde{K}_{XZ}^{(j)} - \tilde{K}_{s_{XZ}}^{(j)} $, м ² | 2730 | 4477 | 4685 |
| Относительная погрешность оценивания КМ $\delta\tilde{K}_{XZ}^{(j)} = \tilde{K}_{XZ}^{(j)} - \tilde{K}_{s_{XZ}}^{(j)} / \tilde{K}_{XZ}^{(j)}$, в процентах | 11,8 | 3,7 | 1,9 |
| Рассчитанный с учетом формулы (6) коэффициент корреляции $\tilde{\rho}_{XZ}^{(j)} = \tilde{K}_{XZ}^{(j)} / \tilde{\sigma}_X^{(j)} \tilde{\sigma}_Z^{(j)}$ | 0,22358 | -0,50191 | 0,50005 |
| Оцененный по результатам моделирования коэффициент корреляции $\tilde{\rho}_{s_{XZ}}^{(j)} = \tilde{K}_{s_{XZ}}^{(j)} / \tilde{\sigma}_{s_X}^{(j)} \tilde{\sigma}_{s_Z}^{(j)}$ | 0,23291 | -0,48465 | 0,51015 |
| Абсолютная погрешность оценивания коэффициента корреляции $\Delta\tilde{\rho}_{XZ}^{(j)} = \tilde{\rho}_{XZ}^{(j)} - \tilde{\rho}_{s_{XZ}}^{(j)} $ | 0,00933 | 0,01726 | 0,01011 |
| Относительная погрешность оценивания коэффициента корреляции $\delta\tilde{\rho}_{XZ}^{(j)} = \tilde{\rho}_{XZ}^{(j)} - \tilde{\rho}_{s_{XZ}}^{(j)} / \tilde{\rho}_{XZ}^{(j)}$, в процентах | 4,2 | 3,4 | 2,0 |

Выводы

Исходя из результатов моделирования можно сделать вывод о том, что абсолютная и относительная погрешности оценивания ковариационного момента и коэффициента корреляции незначительны. Следовательно, формула (6) дает результаты, пригодные в дальнейших практических расчетах, в частности, для корректной работы третичной обработки радиолокационной информации.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Т06М-025 от 01.02.2006 г.)

PRECISION CHARACTERISTICS OF RADAR INFORMATION DURING DYNAMICAL ALIGNMENT

U.A. APAROVITCH, T.U. PRAKOFYEVA, A.V. SHAUCHENKA

Abstract

Theoretical calculation of covariance moments and coefficients of cross correlation of air object coordinates for dynamical alignment was carried out. Received values were compared with simulated results.

Литература

1. Апович В.А, Прокофьева Т.В., Гапеев К.С. // Докл. БГУИР. 2008. № 4. С. 5–12.