

УДК 621.396.962

О ВОЗМОЖНОСТИ ОДНОПОЗИЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСТАНЦИИ ДО ОБЪЕКТА В ПАССИВНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ РАДИОТЕЛЕСКОПА

Рудинский А.В., Шенгелия М.В.

ООО «Миквалекс», Санкт-Петербург, e-mail: avkar@mail333.com

В статье изложены теоретические основы однопозиционного пассивного метода определения координат космических объектов, обладающих электромагнитным излучением. Метод основан на использовании расширения информационного пространства измерений с помощью радиотелескопов, позволяющих измерять не только угловые координаты, но и мощность сигнала от объекта. Приведены модели изменения пеленга, угла места и уровня сигнала, позволяющие сформировать вектор начального состояния объекта, который в дальнейшем уточняется с помощью фильтра Калмана, на базе текущих синхронных измерений пеленга, угла места и уровня сигнала от объекта наблюдения, проводимых через равные промежутки времени. Реализация метода даёт возможность измерять координаты излучаемых объектов одиночными носителями без привлечения других носителей для построения линейной базы измерений, как это делается в настоящее время.

Ключевые слова: пассивная радиолокация, радиотелескоп, координаты объекта, пеленг, угол места, уровень сигнала, мощность сигнала, фильтр Калмана

ABOUT THE POSSIBILITY OF THE SINGLE-POSITIONED DETERMINATION OF THE DISTANCE TILL THE OBJECT DURING THE PASSIVE ACTIVITY REGIMEN

Rudinskiy A.V., Shengeliya M.V.

«Mikvaleks» LLC, Saint-Petersburg, e-mail: avkar@mail333.com

Theoretical basis of single-positioned passive method of determination of those objects bearings in space, that possess electromagnetic emanation. The method is based on the usage of widening of the information space of radio telescopic measurements, that allow to measure not only angular positions, but also the power of signal from the object. Models of bearing deviation, angle of site and signal level, that allow to form the vector of initial condition are represented. The realization of the method provides us with the possibility to measure the bearings of emitting objects by the single carrier without engaging of other carriers for the construction of the linear base of measurements, as it is done at the present time.

Keywords: passive radiolocation, radio telescope, object position, bearing, elevation, signal level, signal power, Kalman filter

В основу всех способов астрометрии положен геометрический способ определения дистанции до космического объекта, когда наблюдение за ним ведется из двух пунктов наблюдения, расстояние между которыми известно, и с одновременным измерением углового перемещения объекта. Это позволяет из геометрических соотношений узнавать расстояние [1–5].

Этот ставший за много веков фундаментальным метод указывает на то, что используя только геометрические способы решения задачи определить дистанцию до объекта из одной точки наблюдения невозможно.

Эту мысль подтверждают и уравнения моделей слежения за объектом, которые для горизонтальной и вертикальной плоскости имеют следующий вид.

Модель изменения пеленга во времени:

$$\Pi(\Pi_0, \dot{\Pi}_0, Q_0, (t-t_0)) = \Pi_0 + \arctg \frac{\dot{\Pi}_0(t-t_0)}{1+Q_0(t-t_0)}, \quad (1)$$

где Π_0 – пеленг цели в начальный момент времени; $\dot{\Pi}_0$ – временное изменение пеленга в начальный момент времени; $Q_0 = \left(\frac{\dot{D}_0}{D_0} \right)$ – относительное временное изменение дистанции в начальный момент

времени; \dot{D}_0 – временное изменение дистанции в начальный момент времени; D_0 – дистанция до объекта в начальный момент времени; t – текущий момент времени; t_0 – начальный момент времени, в дальнейшем $(t-t_0)$ обозначается через t .

Модель изменения угла места объекта во времени:

$$\nu(\nu_0, \dot{\nu}_0, Q_0, (t-t_0)) = \nu_0 + \arctg \frac{\dot{\nu}_0(t-t_0)}{1+Q_0(t-t_0)}, \quad (2)$$

где v_0 – угол места в начальный момент времени; \dot{V}_0 – временное изменение угла места в начальный момент времени.

Этот опробованный геометрический метод был перенесён и на радиометрические наблюдения после изобретения радиотелескопов, которые значительно увеличили расстояния и точность наблюдения за космическими объектами по сравнению с оптическими методами.

В данной работе авторы предлагают метод пассивного определения расстояния до космических объектов с помощью одиночного радиотелескопа за счёт расширения информационного пространства измерений при условии равномерного и прямолинейного движения объекта и наблюдателя.

В самом деле, независимо от природы электромагнитного излучения космических объектов (синхротронные излучения, возникающие при движении релятивистских электронов в мощных магнитных полях, окружающих сверхмассивные черные дыры в галактических ядрах, квазары, свечение галактик как в радиодиапазоне, так и в инфракрасной области, видимом свете,

ультрафиолете и так далее), мощность сигнала от объектов на входе антенны радиотелескопа обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника излучения и убывает под воздействием среды по экспоненциальному закону.

Тогда, обозначив уровень сигнала в текущий момент времени через $U(t)$,

$$U(t) \equiv 10 \lg(P_t) - 10 \lg(P_0), \quad (3)$$

где P_t – мощность принятого сигнала в текущий момент времени; P_0 – мощность принятого сигнала в начальный момент времени; получим:

$$U(t) \equiv 10 \lg \frac{D_0^2}{D_t^2} - \delta(D_t - D_0), \quad (4)$$

где δ – коэффициент километрического ослабления сигнала на трассе объект-наблюдатель; D_t – дистанция до объекта в текущий момент времени.

При равномерном и прямолинейном движении объекта и наблюдателя модель изменения во времени центрированного уровня сигнала имеет вид:

$$U(t) = \delta D_0 \left[1 - \sqrt{(1+tQ_0)^2 + t^2((\dot{\Pi}_0)^2 \cos^2 v_0 + (\dot{V}_0)^2 \sin^2 v_0)} \right] - 10 \lg \left[(1+tQ_0)^2 + t^2((\dot{\Pi}_0)^2 \cos^2 v_0 + (\dot{V}_0)^2 \sin^2 v_0) \right]. \quad (5)$$

Анализ уравнений измерения (1–5) даёт возможность определить шестимерный вектор состояния

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T = (\Pi_0, \dot{\Pi}_0, Q_0, D_0, v_0, \dot{V}_0)^T, \quad (6)$$

где X – вектор состояний; x_1 – x_6 – компоненты вектора состояний.

Уравнение состояния в таком случае имеет вид

$$X_{i+1} = X_i \quad (7)$$

где X_{i+1} – вектор состояний в момент времени t_{i+1} ; X_i – вектор состояний в момент времени t_i .

Так как уравнения измерения (1), (2), (5) являются нелинейными относительно

составляющих вектора состояния, то необходимо линеаризовать эти уравнения в окрестности некоторой априорной оценки вектора состояния.

Чем точнее будет эта априорная оценка вектора состояния, тем быстрее будет сходимость дальнейших оценок (в процессе фильтрации по Калману) к истинному значению вектора состояния.

Уравнение калмановской фильтрации (вектор состояния шестимерный, вектор измерения трёхмерный) имеет вид

$$\hat{X}_{i+1} = \hat{X}_i + \text{cov } X_{i+1} \cdot \left[\begin{aligned} & (\Pi_{i+1} - \Pi(X_i)) \frac{\text{grad}(\Pi_{(t_{i+1}))}}{\sigma^2 \Pi} + (v_{i+1} - v(X_i)) \frac{\text{grad}(v_{(t_{i+1}))}}{\sigma^2 v} + \\ & + (U_{i+1} - U(X_i)) \frac{\text{grad}(U_{(t_{i+1}))}}{\sigma^2 U}; \end{aligned} \right] \quad (8)$$

$$\text{cov}^{-1} X_{i+1} = \text{cov}^{-1} X_i + \text{grad} \Pi_{(t_{i+1})} \frac{\text{grad}^T(\Pi_{(t_{i+1}))}}{\sigma^2 \Pi} + \text{grad} v_{(t_{i+1})} \frac{\text{grad}^T(v_{(t_{i+1}))}}{\sigma^2 v} + \text{grad} U_{(t_{i+1})} \frac{\text{grad}^T(U_{(t_{i+1}))}}{\sigma^2 U}, \quad (9)$$

где \hat{X}_i, \hat{X}_{i+1} – оценки вектора состояния на i -й и $(i+1)$ -й моменты времени соответственно; $\text{cov}X_i, \text{cov}X_{i+1}$ – оценки ковариационной матрицы вектора состояния на i -й и $(i+1)$ -й моменты времени соответственно; $\text{grad}\Pi_{(t_{i+1})}$ – градиент функции $\Pi(\Pi_0, \dot{\Pi}_0, Q_0, D_0, v_0, \dot{v}_0)$ в $(i+1)$ -й момент времени; $\text{grad}v_{(t_{i+1})}$ – градиент функции $v(\Pi_0, \dot{\Pi}_0, Q_0, D_0, v_0, \dot{v}_0)$ в $(i+1)$ -й мо-

мент времени; σ – среднее квадратичное отклонение; $\text{grad}U_{(t_{i+1})}$ – градиент функции $U(\Pi_0, \dot{\Pi}_0, Q_0, D_0, v_0, \dot{v}_0)$ в $(i+1)$ -й момент времени; $\Pi_{i+1}, v_{i+1}, U_{i+1}$ – измерения пеленга, угла места, централизованного уровня сигнала в тракте измерения пеленга, централизованного уровня сигнала в тракте измерения угла места соответственно; $\Pi(X_{i+1}), v(X_{i+1}), U(X_{i+1})$ – прогнозы пеленга, угла места, централизованного уровня сигнала соответственно,

$$\text{grad}\Pi = \left(\frac{\partial \Pi}{\partial \Pi_0}, \frac{\partial \Pi}{\partial \dot{\Pi}_0}, \frac{\partial \Pi}{\partial Q_0}, \frac{\partial \Pi}{\partial D_0}, \frac{\partial \Pi}{\partial v_0}, \frac{\partial \Pi}{\partial \dot{v}_0} \right)^T; \quad (10)$$

$$\text{grad}v = \left(\frac{\partial v}{\partial \Pi_0}, \frac{\partial v}{\partial \dot{\Pi}_0}, \frac{\partial v}{\partial Q_0}, \frac{\partial v}{\partial D_0}, \frac{\partial v}{\partial v_0}, \frac{\partial v}{\partial \dot{v}_0} \right)^T; \quad (11)$$

$$\text{grad}U = \left(\frac{\partial U}{\partial \Pi_0}, \frac{\partial U}{\partial \dot{\Pi}_0}, \frac{\partial U}{\partial Q_0}, \frac{\partial U}{\partial D_0}, \frac{\partial U}{\partial v_0}, \frac{\partial U}{\partial \dot{v}_0} \right)^T. \quad (12)$$

С помощью фильтра Калмана определяем компоненты вектора состояния, которые затем пересчитываем на заданный момент времени и по известным формулам определяем значения не только сферических координат (пеленг на объект (Π), угол места (v), дистанцию до объекта (D)), но и значение скорости и курса движения объекта.

Преимущества предлагаемого пассивного однопозиционного метода определения дистанции состоят в следующем:

– любой радиотелескоп может решать задачу определения дистанции до объекта независимо от других радиотелескопов;

– отпадает необходимость решения сложнейшей задачи по синхронизации измерений на базовых радиотелескопах;

– метод позволит повысить эффективность работы радиотелескопов, установленных на искусственных спутниках и звездолётах.

Метод признан изобретением и защищен патентами.

Список литературы/References

1. Aidala V.J. Kalman Filter Behavior in Bearings – Only Tracking Application, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-15, 1979, pp. 29–39.

2. Tislenko V.I. Analysis of Dynamic Algorithm of the Tracking in Two Position Passive Location System, in Proceedings of the 1994 Progress in Electromagnetics Research Symposium, European Space Agency, Noordwijk, the Netherlands, July 11–15: Kluwer Academic Publishers, (CD-ROM), 1994.

3. Gong K.F., Lindgren A.G., Nardone S.C. Passive localization and motion analysis with a state parameter constraint, 15 th A silomar Conference on Syst, Circ. and Computers, Nov. 1981.

4. Spingarn K. Passive Position Location Estimation Using the Extended Kalman Filter, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-23, 1987, pp. 558–567.

5. Nardone S.C., Aidala V.J. Observability Criteria For Bearings – Only Target Motion Analysis, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-17, 1981, pp. 162–166.

Рецензент:

Галушкин А.И., д.т.н., профессор, начальник лаборатории, ФГАНУ «Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти», г. Москва;

Ипатов О.С., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Балтийского государственного университета «Военмех им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 01.10.2013.