

УДК 621.396

М. М. Калипанов, Kmm75565@mail.ru

Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи МО РК

ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

В статье рассматриваются основы радиолокационных систем координат, используемых для определения местоположения цели. Описаны такие параметры, как наклонная дальность, азимут и угол места, а также их связь с различными системами координат. Особое внимание уделено сферической и цилиндрической системам координат, а также их применению в радиолокации. Рассматриваются локальные и глобальные системы координат, включая географическую (геодезическую) и геоцентрическую (геосферическую) системы. Приводятся формулы, позволяющие определить координаты объекта в этих системах, и описывается их связь с реальной моделью Земли. Упрощение математической модели Земли для целей радиолокации также обсуждается в контексте использования вычислительных машин для решения сложных задач.

Ключевые слова: радиолокация, наклонная дальность, азимут, угол места, системы координат, сферическая система координат, цилиндрическая система координат, географическая система координат, геоцентрическая система координат, геодезическая широта, геодезическая долгота, модель Земли, радиус Земли, вычислительные машины.

Введение

Умение правильно ориентироваться имеет исключительное значение на войне. Разобраться в окружающей обстановке, определить свое местонахождение, выдержать заданное направление – чрезвычайно важно во всяком бою. Опыт многих войн убеждает, что умение ориентироваться, особенно ночью, в туман и при плохой видимости, иногда играет решающую роль в ведении боя. Незнание приемов ориентирования может привести порой к весьма печальным последствиям [1].

Появление средств спутниковой навигации, казалось бы, окончательно решило проблему ориентации в пространстве людей и технических средств. Но опыт военных действий в Ираке и Югославии убедительно показал, что полагаться на системы спутниковой навигации нужно с осторожностью, так как они подвержены подавлению и спуффингу (искажению координат).

Радиолокационное ориентирование в пространстве воздушных объектов развивается достаточно давно [2, 3, 4, 5], однако при радиолокационном ориентировании наземных объектов появляются специфические проблемы.

Ошибки ориентирования РЛС приводят к появлению ошибок определения координат воздушных целей, что, в свою очередь, приводит к неточным целеуказаниям для зенитных комплексов.

Постановка проблемы (задачи)

За топогеодезическое обеспечение и привязку элементов боевого порядка отвечают начальники штабов полков, а за ориентирование средств – заместители командиров полков по вооружению. В подразделениях по части назначаются офицеры, ответственные за топографическую привязку средств.

Основными задачами топогеодезического обеспечения боевых действий являются:

заблаговременная подготовка территории в топогеодезическом отношении и доведение исходных астрономо-геодезических данных до частей и подразделений;

пополнение запасов топографических и специальных карт и своевременное обеспечение ими частей и подразделений по полной норме в установленные сроки;

топогеодезическая подготовка позиционных районов;

топогеодезическая привязка элементов боевого порядка.

Наиболее сложные задачи топогеодезического обеспечения, требующие специальной подготовки личного состава и применения высокоточной топографической техники, выполняет топографическая служба соединений и частей. Топографическую привязку элементов боевого

порядка командных пунктов и зенитных ракетных дивизионов выполняют штатные топогеодезические отделения топопривязчиков.

Информация о координатах радиолокационных станций передается в автоматизированную систему управления (АСУ) войсками, в задачу которой входит перерасчет координат обнаруженных целей из локальных систем координат радиолокационных станций в локальную систему координат зенитного комплекса при выдаче целеуказаний. Эта процедура занимает некоторое время Δt . За это время цель смещается на дистанцию $\Delta l = \Delta t \cdot v$, где v – скорость цели. Это может приводить к ошибке целеуказания $\Delta \alpha = \Delta l / D$, где D – наклонная дальность цели.

Если цель движется со скоростью 800 км/час на дистанции 150 км, а время, необходимое АСУ для выполнения задач вторичной и третичной обработки, идентификации цели и формирования целеуказаний, принять 100 секунд, то ошибка целеуказания может достигать значений:

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta t \cdot v}{D} = \frac{(100/3600) \cdot 800}{150} = 0,15 \text{ рад} = 8,3^\circ$$

что явно неприемлемо для зенитного комплекса. Такая же ошибка целеуказания на БПЛА, летящий со скоростью 100 км/ч на дистанции 10 км, может достигать значений:

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta t \cdot v}{D} = \frac{(100/3600) \cdot 100}{10} = 0,28 \text{ рад} = 15,6^\circ$$

Таким образом, существует необходимость выдачи целеуказания на зенитные средства, минуя АСУ, что потребует решения задачи преобразования систем координат либо в РЛС разведки, либо в зенитном комплексе, либо в обеих системах одновременно.

Цель статьи

Рассмотреть ограничения по точности определения местоположения радиолокационных станций с применением существующих методов, способных влиять на ошибки целеуказания.

Методы исследования

В качестве основных методов исследования в данной статье были использованы методы преобразования систем координат.

Изложение основного материала (результаты/обсуждения)

Системы координат (СК), используемые в радиолокации [6, 7]. При радиолокационном определении местоположения наиболее часто применяют *местную сферическую систему координат*, начало которой находится в точке размещения антенны. В наземной РЛС одна из осей координатной системы обычно совпадает с северным направлением меридиана, проходящего через позицию антенны РЛС, а местоположение цели Ц находится по результатам измерения наклонной дальности D , азимута α и угла места β (рис. 1, а). При этом система координат неподвижна относительно земной поверхности. Если РЛС располагается, например, на движущемся объекте, то ось X координатной системы совмещается с продольной осью объекта, а ось Y – перпендикулярна ей и лежит в плоскости погона объекта (рис. 1, б), образуя с осью H , направленной по нормали вверх, левостороннюю декартову систему координат. В этом случае для определения местоположения цели измеряются наклонная дальность D , курсовой угол цели α и угол места β . Такая связанная с объектом система координат перемещается относительно земной поверхности со скоростью, равной скорости движения объекта, и поворачивается вокруг Земли при его эволюциях.

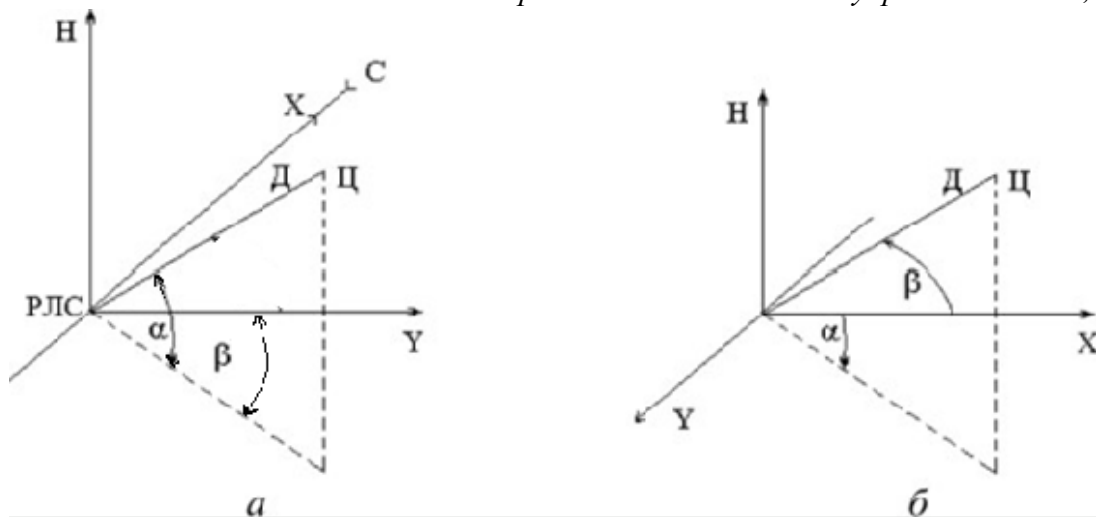


Рисунок 1 – Местные сферические системы координат:

а – при расположении РЛС на поверхности Земли; б – при расположении РЛС на борту летательного аппарата

Наклонная дальность D представляет собой расстояние по прямой от радиолокационной станции (РЛС) до цели. Азимут цели α – это угол между вертикальной плоскостью, которая проходит через цель, и начальным направлением отсчета. Азимут называют истинным пеленгом, если отсчет ведется от северного меридиана, или курсовым углом (КУ), если отсчет производится относительно продольной оси летательного аппарата (ЛА) или диаметральной плоскости корабля.

Угол места β – это угол между направлением на цель и его проекцией на горизонтальную плоскость.

Когда РЛС установлена на летательном аппарате (ЛА), ось X координатной системы совпадает с продольной осью ЛА, а ось ZZ направлена вдоль правого крыла (рис. 1.б). В таком случае для определения местоположения цели измеряют наклонную дальность D , курсовой угол — азимут цели α и угол места β . Эта система координат, связанная с ЛА, движется по земле с той же скоростью, что и ЛА, и поворачивается относительно Земли в зависимости от его маневров.

Кроме сферической системы координат, в радиолокации используется цилиндрическая система, где координатами являются горизонтальная дальность D_g , азимут α и высота H (рис. 2).

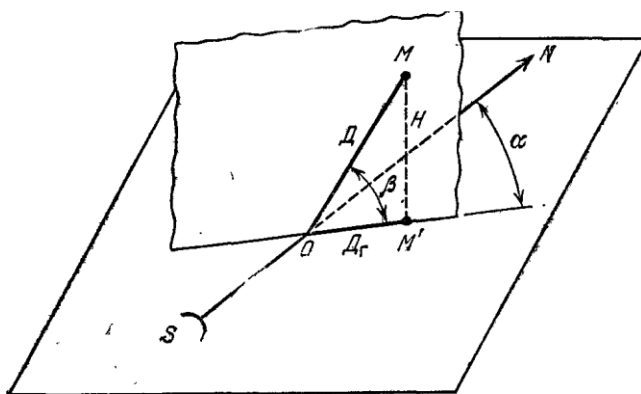


Рисунок 2 – Цилиндрическая система координат

Горизонтальная дальность $D_g = OM'$, OM' – это проекция наклонной дальности на горизонтальную плоскость. Высота цели H – это длина перпендикуляра, опущенного из точки M на горизонтальную плоскость, то есть $H=MM'$.

Очевидно, что:

$$D_r = D \cos \beta; H = D \sin \beta; \quad (1)$$

$$D = \sqrt{D_r^2 + H^2}. \quad (2)$$

Для определения местоположения используют как локальные системы координат (рис. 1, 2), так и глобальные. Локальные системы применяются для дальностей D , не превышающих несколько сотен километров (в пределах прямой видимости), в то время как глобальные используются для больших расстояний. Глобальные системы координат жестко привязаны к Земле и охватывают всю поверхность или значительную ее часть. Наиболее известными глобальными системами являются географическая (геодезическая) и геоцентрическая (геосферическая) системы координат.

В географической (геодезической) системе координат СК $O_G X_G Y_G$ (рис. 3) Земля представлена эллипсоидом вращения. В СССР, согласно Постановлению Совета министров от 7 апреля 1946 года, был принят эллипсоид Красовского, малая полуось которого составляет 6 356 863 м, а большая — 6 378 245 м. В других странах используется эллипсоид Хейфорда-Кларка, чьи размеры отличаются от эллипсоида Красовского на несколько сотен метров. Положение точки C на поверхности эллипсоида определяется геодезическими координатами: географической широтой φ_G и географической долготой λ_G .

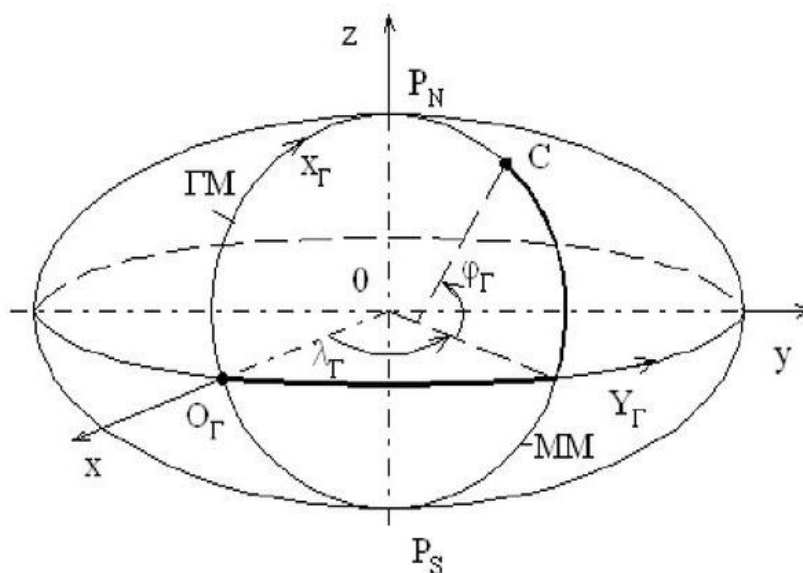


Рисунок 3 – Географическая (геодезическая) система координат

Географической широтой точки называется угол между плоскостью экватора и нормалью к поверхности эллипсоида в этой точке. Нормаль обычно не пересекает экватор в его центре. Широта измеряется от плоскости экватора к Северному и Южному полюсам, от 0 до ± 90 градусов.

На рисунке 3 буквами o , x , y , z обозначена основная система координат, связанная с центром Земли и вращающаяся вместе с ней.

Географическая долгота — это угол между плоскостью начального меридиана (Гринвичского) и местным меридианом точки C , который проходит через проекцию объекта на земную поверхность. Долгота измеряется от 0 до 360 градусов, причем восточная долгота имеет знак плюс, а западная — минус.

Хотя поверхность эллипсоида математически точно описана, задачи радиолокации решаются с помощью высокоскоростных цифровых вычислительных машин, так как вычисления слишком сложны для обычных методов. Поэтому часто используется упрощенная модель Земли в виде шара с радиусом 6 371 110 м.

Геоцентрическая (геосферическая) система координат $O_{гц}X_{гц}Y_{гц}Z_{гц}$ основывается на представлении Земли в виде шара (рис. 4). В этой системе геоцентрическая широта $\phi_{гц}$ определяется как угол между экваториальной плоскостью и направлением радиуса-вектора от объекта к центру Земли. Способ отсчета геоцентрической долготы (λ) аналогичен географической долготе.

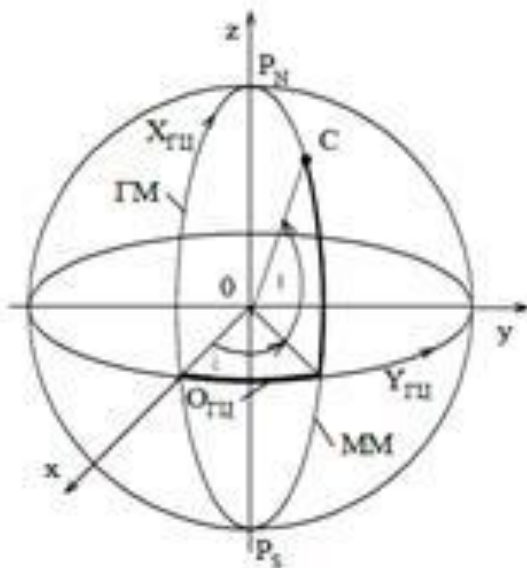


Рисунок 4 – Геоцентрическая (геосферическая) система координат

Таким образом, в современной радиолокации используются местные и глобальные СК. Следует отметить, что местные системы декартовых координат – левосторонние, а глобальные системы – правосторонние, что следует учитывать при преобразовании систем координат.

Для правильного преобразования координат необходимо знание реальных местоположений, как радиолокатора разведки, так и зенитного комплекса. Учитывая, что координаты месторасположения являются секретной информацией и они могут меняться в ходе боевых действий, то необходима либо передача этих координат между станцией разведки и зенитным комплексом, либо передавать данные о координатах цели необходимо в некой промежуточной системе координат. Такой промежуточной системой координат могла бы служить одна из глобальных систем координат. В этом случае при передаче данных целеуказания радиолокатор разведки не передавал бы координаты своего месторасположения, а зенитный комплекс мог бы, зная свои текущие координаты, преобразовывать полученные координаты цели в целеуказания в свою (локальную) СК.

В общем случае преобразование одной декартовой системы координат в другую разделяется на 2 этапа:

- поворот систем координат таким образом, чтобы оси локальной системы координат стали параллельны осям той СК, в которую нужно преобразовать координаты цели;
- смещение системы координат вдоль их осей на такую величину, чтобы совпали центры систем координат обеих СК.

Поворот систем координат осуществляют с помощью матриц поворота

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Положительным углом поворота считается поворот против часовой стрелки, если смотреть навстречу оси поворота. Для поворота по часовой стрелке знак угла поворота необходимо изменить на противоположный.

Сдвиг систем координат (при переходе к глобальной СК) обычно осуществляется переносом системы координат в центр Земли. Однако это не обязательно. Достаточно, чтобы обе стороны знали о том, где расположен центр промежуточной СК. Возможна разработка такой системы пересчета координат, при которой центр промежуточной СК может меняться ежедневно или еженедельно. Противник, не зная о том, какая точка принята в качестве центра в промежуточной СК, не сможет правильно идентифицировать цель, на которую передается целеуказание.

Так как местные системы координат в радиолокации – левосторонние, а глобальные СК – правосторонние, то промежуточную глобальную СК целесообразно выбрать также левосторонней, что упростит преобразование координат с помощью матриц поворотов.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Передача целеуказаний о воздушных, минуя АСУ, приводит к снижению времени их передачи и, соответственно, ошибок целеуказания.
2. При передаче целеуказаний координаты целей целесообразно передавать в промежуточной глобальной системе декартовых координат.
3. Глобальную СК целесообразнее использовать левостороннюю.
4. Динамическое изменение во времени координат центра промежуточной СК повысит безопасность передачи данных о воздушных целях.

Благодарности. «Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК» (Грант № AP148036/0222)

Литература

1. М.Ф. Беляков. Ориентирование на местности без карты. – М.: Воениздат, 1955. <https://docs.yandex.kz/docs/view?tm=1722406241&tld=kz&lang=ru&name=geokniga>.
2. Scannapieco, A.F., Graziano, M.D., Fasano, G., Renga, A. (2019) Improving radar-based mini-UAS navigation in complex environments with outlier rejection. AIAA Scitech 2019 Forum. https://www.researchgate.net/publication/330196408_Improving_radar-based_mini-UAS_navigation_in_complex_environments_with_outlier_rejection.
3. Scannapieco, A.F., Renga, A., Fasano, G., Moccia, A. (2017) Ultralight radar for small and micro-UAV navigation. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 42(2W6), страницы 333–338 https://www.researchgate.net/publication/319413337_ULTRALIGHT_RADAR_FOR_SMALL_AND_MICRO-UAV_NAVIGATION.
4. Неусыпин К. А. (2009) Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. Гироскопия и навигация. <https://elibrary.ru/item.asp?id=19642445>.
5. Костоусов А.В., Костоусов В.Б. (2007) Распределенные вычисления и моделирование процесса навигации по радиолокационным изображениям. Автоматика и телемеханика PACS 07.05.Тр. <https://naukarus.com/raspredeleennyie-vychisleniya-i-modelirovanie-protssessa-navigatsii-po-radiolokatsionnym-izobrazheniyam>.
6. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004.
7. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М.: Советское радио, 1975.

8. Дмитриев Д.Д. и др., Боевое применение подразделений РТВ ВВС. Радиолокационная станция П-18: [Учебное пособие]//Красноярск: СФУ, 2011. – 166с.
9. Radar equations for modern radar. Author(s), Barton, David K. Publication, Norwood: Artech House, 2012. - 448 p.
10. Конкин Ю. В. Разработка системы определения координат летательного аппарата на основе совмещения радиолокационной и картографической информации // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, 144 стр.