

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ ЦЕЛИ ИЛИ ПРЕСЛЕДОВАТЕЛЯ

Г. Л. Поляк

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
Институт проблем управления РАН имени В. А. Трапезникова

Поступила в редакцию 10.03.2015 г.

Аннотация. Работа посвящена определению курса, скорости цели и дистанции до неё (ЭДЦ) при условии, что цель и преследователь двигаются постоянными курсами и скоростями, но при этом либо цель либо преследователь могут произвести один раз маневр курсом. Предполагается, что наблюдатель производит замеры пеленгов в пассивном режиме. В работе изложены принципы построения комплексного метода определения ЭДЦ при одном маневре курсом. Метод определения ЭДЦ основан на показателях, введенных в работе [1]: величина изменения расстояния логарифмическая (ВИРЛ), величина изменения пеленга (ВИП), которые определяются пеленгованием на прямом курсе и не требуют при этом знания ЭДЦ.

Ключевые слова: задача преследования, задача определения параметров движения цели, программное движение.

DETERMINING THE COORDINATES AND DRIVING PARAMETERS IN MANEUVERING PURPOSE OR PURSUERS

G. L. Polyak

Abstract. The work is devoted to the definition of course, the target speed and the distance to it (EDC), provided that the purpose of the pursuer and move constant course and speed, but it is a goal or stalker could produce a time-course maneuver. It is assumed that the observer produces bearing measurements in passive mode. The paper describes the principles of construction of the complex method of determining the EDC in a single maneuver the course. Method for determination of EDC based on the indicators introduced in [1]: the distance changes logarithmic (WIRL), the amount of change bearing (VIP), which are determined by direction finding on a straight course and do not require knowledge with EDC.

Keywords: pursuit problem, the problem of determining the parameters of motion targets, software movement.

1. ВВЕДЕНИЕ

Элементы движения цели являются одним из основных факторов, влияющих на эффективность использования оружия. В данной работе рассматривается определение ЭДЦ в условиях борьбы за скрытность и, следовательно, в процессе слежения за целью преследователь применяет только методы шумопеленгования. Если преследователь и цель не маневрируют,

то есть следуют постоянными курсом и скоростью, то полные ЭДЦ определить невозможно. Поэтому предлагается построить алгоритм при одном маневре преследователя. Этот алгоритм позволяет построить уравнение, связывающее параметры траектории движения до маневра с параметрами движения после маневра. Это уравнение оказывается одинаковым как при маневре преследователя, так и при маневре цели, что позволяет построить алгоритм определения ЭДЦ при знании времени маневра цели. В работе [1] предложен алгоритм определения маневра, который можно использовать без определения ЭДЦ и без собственно го маневрирования. Предлагаемые алгоритмы способствуют скрытности преследователя при определении ЭДЦ. Рассматриваемые алгоритмы опираются на введенные в [1] алгоритмы определения величины изменения пеленга и величины изменения логарифма дистанции при равномерном прямолинейном движении наблюдателя и цели.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [1] рассматривалась задача определения параметров движения цели методами пеленгования при условиях равномерного и прямолинейного движения цели и преследователя.

Поскольку в этом случае одним методом пеленгования курс, скорость цели и дистанцию определить нельзя, то в работе ставится задача найти ограничения на параметры движения цели (курс, скорость, дистанцию), которые определяют множество возможных ЭДЦ. В настоящей работе показано, что можно получить одно единственное значение ЭДЦ с помощью двух алгоритмов. Первый основан на одноразовом применении преследователем маневра по курсу. Второй алгоритм основан на том, что преследователь длительно наблюдает и выжидает маневр цели по курсу, определяет время маневра и затем по ВИП и ВИРЛ на обоих отрезках траектории определяет ЭДЦ.

3. ИНТЕГРИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ЦЕЛИ И НАБЛЮДАТЕЛЯ В ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИП И ВИРЛ

Предположим, что цель и наблюдатель двигаются равномерно и прямолинейно. Тогда уравнения движения цели в относительных координатах (относительно наблюдателя) записутся в следующем виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{dD}{dt} &= V \cos(\Pi - K) \\ \frac{d\Pi}{dt} &= -\frac{V \sin(\Pi - K)}{D(t)} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где: Π — пеленг наблюдателя на цель, D — дистанция между целью и наблюдателем, t — время, V — относительная скорость цели (константа), K — относительный курс цели (константа).

Относительный курс и относительная скорость цели связаны с курсами и скоростями наблюдателя и цели следующими зависимостями

$$\left. \begin{aligned} V \cos(\Pi - K) &= V_2 \cos(\Pi - K_2) - V_1 \cos(\Pi - K_1) \\ V \sin(\Pi - K) &= V_2 \sin(\Pi - K_2) - V_1 \sin(\Pi - K_1) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где: V_2, K_2 — скорость и курс цели (константы), V_1, K_1 — скорость и курс наблюдателя (константы).

Из двух уравнений системы (1) получим одно уравнение

$$\frac{dD}{d\Pi} = -D \frac{\cos(\Pi - K)}{\sin(\Pi - K)}. \quad (3)$$

Проинтегрируем уравнение (3) и будем иметь

$$D(t) \sin(\Pi(t) - K) = D_0 \sin(\Pi_0 - K) = \text{const}, \quad (4)$$

где $D(t)$, $\Pi(t)$ — начальные значения дистанции и пеленга.

Нижнее уравнение системы (1) представим в следующем виде

$$\frac{d\Pi}{dt} = -\frac{V \sin^2(\Pi - K)}{D \sin(\Pi - K)} = -\frac{V \sin^2(\Pi - K)}{D_0 \sin(\Pi_0 - K)}. \quad (5)$$

В силу соотношения (4) знаменатель в правой части уравнения (5) не зависит от переменной величины t , поэтому после интегрирования будем иметь

$$\operatorname{ctg}(\Pi - K) = \operatorname{ctg}(\Pi_0 - K) + \frac{V}{D_0 \sin(\Pi_0 - K)}(t - t_0). \quad (6)$$

Если левую часть равенства (6) умножить на левую часть равенства (4), а правую часть равенства (6) умножить на правую часть равенства (4) и в полученном равенстве сделать необходимые преобразования, то получим решение уравнения (5) в виде

$$D \cos(\Pi - K) = D_0 \cos(\Pi_0 - K) + V(t - t_0). \quad (7)$$

Введем обозначения

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = \alpha(t) = \frac{D(t) \sin(\Pi(t) - K)}{V} \\ \beta = \beta(t) = \frac{D(t) \cos(\Pi(t) - K)}{V} \end{array} \right\}. \quad (8)$$

где: $D(t)$, $\Pi(t)$ — дистанция и пеленг.

При обозначениях (8) решение уравнений (1) будет иметь вид

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = \alpha_0, \\ \beta(t) = \beta_0 + t - t_0. \end{array} \right. \quad (8a)$$

Из приведенных выше выкладок следует вывод, что в режиме пеленгования можно определить только комплексные величины α и β или величины производные от них. Действительно, из соотношений (8) получим уравнение $\operatorname{tg}(\Pi(t) - K) = \frac{\alpha}{\beta(t)}$, из которого следуют два уравнения при трёх замерах пеленга

$$\Pi_k - \Pi_0 = \operatorname{arctg} \left(\frac{\alpha_0}{\beta_0 + (t_k - t_0)} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{\alpha_0}{\beta_0} \right), \quad k = 1, 2, \quad (9)$$

где Π_k — текущие пеленги в моменты времени t_k , Π_0 — пеленг в начальный момент времени t_0 . Из этих двух уравнений можно определить две неизвестные величины α_0, β_0 .

4. УРАВНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЁТА ДИСТАНЦИИ ПОСЛЕ МАНЕВРА

Предварительно найдем формулы для определения ВИР и ВИРЛ.

Для этого преобразуем уравнения (1), умножив числитель и знаменатель в правых частях на одно и то же выражение

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dt} &= V \cos(\Pi - K) = \frac{\frac{D^2}{V^2} V \cos(\Pi - K)}{\frac{D^2}{V^2}}, \\ \frac{1}{D} \frac{dD}{dt} &= \frac{d \ln D}{dt} = \frac{\frac{D}{V} \cos(\Pi - K)}{\frac{D^2}{V^2}} = \frac{\beta(t)}{\alpha^2 + \beta^2(t)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{d\pi}{dt} = -\frac{V}{D} \sin(\pi - K) = -\frac{\frac{D}{V} \sin(\pi - K)}{\frac{D^2}{V^2}} = -\frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta^2}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) определяется производная пеленга, которая называется величиной изменения пеленга $BIP = \frac{d\pi}{dt}$. Из уравнения (10) определяется производная логарифма дистанции. В штурманской практике пользуются значением производной дистанции, которую называют величиной изменения расстояния BIR . По аналогии введено обозначение $BIRL = \frac{d \ln(D)}{dt}$, которая названа [1] величиной изменения расстояния логарифмической. Эта величина отвечает на вопрос: во сколько раз изменилась дистанция, в то время как BIR отвечает на вопрос на сколько изменилась дистанция. $BIRL$ имеет то преимущество, что она может быть рассчитана только по замерам пеленгов, в то время как для получения ей BIR требуются замеры дистанции. Отметим, что обе введенные величины имеют ясный физический смысл.

Возьмём теперь уравнения (2) и умножим их левые и правые части на один и тот же множитель $\frac{D}{V^2}$, используем равенство $\frac{D^2}{V^2} = \alpha^2 + \beta^2$, которое легко получается из формул (8), и определение BIP , $BIRL$ по формулам (10), (11) получим уравнения

$$\begin{aligned} -BIP \cdot D + V_1 \sin(\pi - K_1) &= V_2 \sin(\pi - K_2), \\ BIRL \cdot D + V_1 \cos(\pi - K_1) &= V_2 \cos(\pi - K_2). \end{aligned}$$

Если левые и правые части этих уравнений возвести в квадрат и затем сложить получим следующее основное уравнение

$$D(BIP^2 + BIRL^2) + 2V_1(BIRL \cdot \cos(\pi - K_1) - BIP \cdot \sin(\pi - K_1)) = \frac{V_2^2 - V_1^2}{D}. \quad (12)$$

Уравнение (12) обладает замечательным свойством: в левой части находятся известные или определяемые при наблюдении величины и одна неизвестная величина — дистанция, которая входит линейно, а в правой части находятся неизвестные величины — скорость убегающего и дистанция, которые не меняются в момент маневра. Из этого свойства уравнения (12) следует, что в уравнениях для прямолинейного галса до маневра и для галса после маневра, полученных из (12), правые части будут равны. Следовательно, можно написать уравнение для определения дистанции. Предварительно сделаем следующие замечания: в момент маневра дистанция и пеленг в конце предыдущего галса равны дистанции и пеленгу в начале последующего галса, а скорость преследователя на обоих галсах одинакова. С учетом этого примем в формуле для определения дистанции с помощью маневра из двух галсов следующие обозначения: D — дистанция в точке маневра (смены галсов), π — пеленг в точке маневра (смены галсов), V — скорость преследователя на обоих галсах, K_1 , K_2 — курсы преследователя на первом и втором галсах соответственно, BIP_1 , BIP_2 — величина изменения пеленга на первом и втором галсах в момент маневра t , $BIRL_1$, $BIRL_2$ — величина изменения расстояния логарифмическая на первом и втором галсах соответственно в момент маневра t .

Воспользовавшись для первого и второго галса уравнением (12) получим в общем случае следующее выражение для значения дистанции в точке маневра

$$D = \frac{2V((BIRL_2 \cos(\pi - K_2) - BIRL_1 \cos(\pi - K_1)) - (BIP_2 \sin(\pi - K_2) - BIP_1 \sin(\pi - K_1)))}{BIP_1^2 - BIP_2^2 + BIRL_1^2 - BIRL_2^2}.$$

Это выражение определяет дистанцию при маневре преследователя, изменившем курс с K_1 на K_2 . Для случая маневра цели курс преследователя остается неизменным. Общее выражение можно упростить, введя новое обозначение $K = K_1 = K_2$

$$D = \frac{2V((BIRL_2 - BIRL_1) \cos(\pi - K) - (BIP_2 - BIP_1) \sin(\pi - K))}{BIP_1^2 - BIP_2^2 + BIRL_1^2 - BIRL_2^2}. \quad (13)$$

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА ДИСТАНЦИИ ПРИ МАНЕВРЕ ПРЕСЛЕДОВАТЕЛЯ КУРСОМ

Рассмотрим демонстрационный пример определения дистанции при маневре преследователя курсом. Положение преследователя и убегающего представлено на рисунке 1. Начальное положение преследователя: курс 315^0 , скорость 6 узлов, пеленг на цель $347,1^0$, дистанция до цели 10,91 миль. Параметры движения убегающего во время всего процесса определения дистанции постоянны и равны: курс 90^0 , скорость 12 узлов.

Как показано на рисунке 1 в точке а2 преследователь делает маневр на 45^0 и переходит на курс 0^0 при той же скорости 6 узлов, пеленг на цель 0^0 и дистанции до цели 10 миль. В этом случае изменение дистанции и пеленга на первом галсе в течении времени от 0 до 9 минут при курсе преследователя 315^0 на отрезке а1-а2; и на втором галсе в течении времени от 9 до 18 минут при курсе преследователя 0^0 на отрезке а2-а3 (рис. 1) приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Т час	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
D миль	10,91	10,55	10,24	10	9,72	9,48	9,28
П град	347,1	351,1	355,4	0	3,54	7,28	11,2

Для определения требуемых параметров для определения дистанции необходимо произвести расчеты по вышеизложенным формулам. Величины, относящиеся к первому галсу, будут с индексом 1, относящиеся ко второму галсу с индексом 2. Все расчетные параметры будут вычисляться в точке поворота (смены курса) а2. Введем шаг пеленгования по времени Δt и k число шагов пеленгования между пеленгами P_k и P_0 . Пеленг через время Δt обозначим P_1 . Воспользовавшись формулой (9) для получения двух уравнений для пеленгов P_k , P_1 , P_0 получим из них выражение α_1, β_1 в начальной точке движения а1

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -\frac{\Delta t}{1+A^2} \left(\frac{1}{\tan(P_1-P_0)} + A \right), \\ \beta_1 &= \alpha_1 A, \end{aligned} \quad (14)$$

где $A = \frac{1}{(k-1)\tan(P_1-P_0)} - \frac{k}{(k-1)\tan(P_k-P_0)}$.

Для расчета параметров первого галса берем из таблицы 1 три пеленга соответствующих временам 0, 0,05, 0,15 часа. Тогда $k = 3$. Подставив эти значения в формулы (14), получим $\alpha_1 = -0,576$, $\beta_1 = -0,3$. Эти значения относятся к началу движения точке а1, чтобы получить значения этих параметров в точке поворота а2 воспользуемся формулами (9). Тогда получим $\alpha_1 = -0,576$, $\beta_1 = -0,15$. Для вычисления величины изменения пеленга и величины изменения расстояния логарифмической применим формулы (10), (11). Получим следующие значения $BIP_1 = 1,62$, $BIRP_1 = -0,42$. Проведя вычисления в точке поворота для второго галса для трех пеленгов соответствующих временам 0,15, 0,20, 0,3 часа и $k = 3$, $\Delta t = 0,05$, получим $BIP_2 = 1,2$, $BIRP_2 = -0,6$. Теперь найдены все необходимые параметры, подставив которые в формулу для вычисления дистанции получим её почти точное значение в

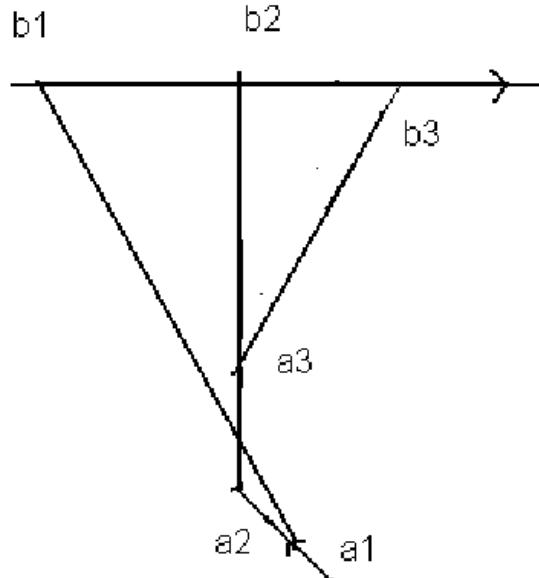


Рис. 1.

точке поворота $D = 9,99$. Имея это значение и используя формулы (2), (9) можно определить элементы движения цели [1].

6. ПРИМЕР РАСЧЕТА ДИСТАНЦИИ ПРИ МАНЕВРЕ КУРСОМ ЦЕЛИ

Рассмотрим демонстрационный пример определения дистанции при маневре курсом цели. Положение преследователя и убегающего представлено на рисунке 2. Параметры движения преследователя во время всего процесса определения дистанции постоянны и равны: курс 0^0 , скорость 6 узлов. В начальном положении пеленг на цель $350,5^0$, дистанция до цели 11,05 миль. Параметры движения убегающего на первом галсе постоянны и равны: курс 90^0 , скорость 12 узлов. Как показано на рисунке 2 в точке b_2 цель делает маневр на 45^0 и переходит на курс 135^0 при той же скорости 12 узлов, пеленг на цель 0^0 и дистанции до цели 10 миль. В этом случае изменение дистанции и пеленга на первом галсе в течении времени от 0 до 9 минут при курсе цели 90^0 на отрезке b_1-b_2 ; и на втором галсе в течении времени от 9 до 18 минут при курсе цели 135^0 на отрезке b_2-b_3 (рис.2) приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Т час	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
D миль	11,05	10,67	10,32	10	9,29	8,59	7,93
П град	350,5	353,5	356,7	0	3,54	7,32	11,34

Для определения дистанции при маневре цели применим тот же алгоритм расчета, что и в предыдущем примере, только для расчета применим формулу (13). Но для этого при наблюдении за целью надо определить наличие маневра и пеленг в момент маневра, то есть разбить траекторию движения цели на два галса, на каждом из которых определить в точке маневра ВИП и ВИРЛ.

Для определения маневра цели воспользуемся результатами работы [1]. Возьмем алгоритм, исходными данными для которого являются только четыре измеренных пеленга. Итак, пусть имеем четыре пеленга $\Pi_0, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$, взятые через одинаковые промежутки времени. Обозначим

$$A_1 = \operatorname{tg}(\Pi_1 - \Pi_0),$$

$$A_2 = \operatorname{tg}(\Pi_2 - \Pi_0),$$

$$A_3 = \operatorname{tg}(\Pi_3 - \Pi_0)$$

и

$$\Phi = \frac{1}{A_1} - \frac{4}{A_2} + \frac{3}{A_3}. \quad (15)$$

Тогда если $\Phi = 0$, то маневра нет, если $\Phi \neq 0$, то маневр есть. В процессе измерения пеленгов и расчетов возникает случайная ошибка, которая, будем считать, распределена по нормальному закону. Если обозначить через σ среднеквадратическое отклонение пеленга, то среднеквадратическое отклонение Φ равно

$$\sigma_\Phi = \sigma \sqrt{\left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{4}{A_2^2} + \frac{3}{A_3^2} \right)^2 + \left(1 + \frac{1}{A_1^2} \right)^2 + 16 \left(1 + \frac{1}{A_2^2} \right)^2 + 9 \left(1 + \frac{1}{A_3^2} \right)^2}.$$

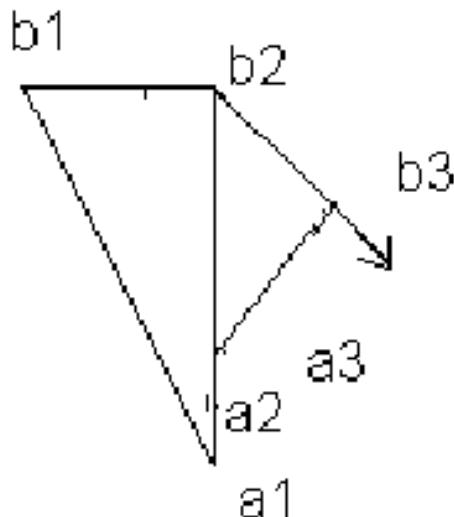


Рис. 2.

Окончательный критерий наличия маневра можно записать в виде:

- если $|\Phi| < 3\sigma_\Phi$, то маневра нет,
- если $|\Phi| \geq 3\sigma_\Phi$, то маневр есть.

Здесь σ — среднеквадратическое отклонение пеленга в расчете примем равным нулю. В нашем примере выбираем окно из четырех пеленгов, рассчитаем значение Φ , затем сдвигаем окно на один шаг и находим следующее значение критерия. Из таблицы 2 видно, что при $T = 0,15$ начинается маневр и цель в этой точке переходит с первого галса на второй. Далее показывается наличие маневра, до тех пор, пока окно из четырех пеленгов не перейдет полностью на второй галс.

Таблица 3.

Т час	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
П град	350,05	353,5	356,7	0	3,54	7,32	11,34
Φ	-	-	-	0,04	1,7	-2,2	0,06

Из таблицы 3 видно, что в момент времени 0,15 часа, при пеленге 0^0 сигнала маневра нет, а в момент 0,2 часа при пеленге $3,54^0$ сигнал маневра есть, поэтому маневр произошел между этими промежутками времени. Примем, что маневр произошел в точке, соответствующей 0,15 часа (на рис. 2 в точке b2). Получается, что цель совершает два галса b1-b2 и b2-b3. На первом галсе определим α_1, β_1 в точке b1 (T=0 часов, пеленг $350,5^0$). Применив формулы (14), получим $\alpha_1 = -0,718, \beta_1 = -0,444$. Поскольку ищется значение дистанции в точке b2, то пересчитаем эти значения от точки b1 к точке b2. Применим формулу (9) и найдем $\alpha_1 = -0,718, \beta_1 = -0,294$. Используя эти данные по формулам (10), (11), найдем $VIP_1 = 1,19$, $VIRL_1 = -0,49$. Аналогично для второго галса в точке поворота b2 найдем эти же значения $\alpha_2 = -0,301, \beta_2 = -0,514$, $VIP_2 = 0,85$, $VIRL_2 = -1,45$. Подставив эти значения в формулу (13), получим значение дистанции в точке смены галса равную 9,95 мили (истинная дистанция 10 миль). Аналогично первому примеру по этим данным можно определить элементы движения цели [1].

7. ВЫВОДЫ

В работе доказана принципиальная возможность определения элементов движения цели и дистанции с использованием пеленгования в пассивном режиме при однократном маневре курсом цели или наблюдателя при равномерном прямолинейном движении другого игрока. Эта возможность вытекает из выведенного в работе уравнения, позволяющего находить дистанцию при маневре цели или преследователя только по *VIP* и *VIRL*, определенных преследователем на первом и втором галсах. Для определения дистанции при маневре цели необходимо использовать частный случай общего уравнения, то есть уравнение (13), и уравнение для определения маневра (15). Представляется, что на точность определения момента маневра будут влиять углы между четырьмя пеленгами, измеренные через равные промежутки времени. Величины этих углов должны быть достаточно большими. Вследствие этого по видимому целесообразно вычислять показатель маневра Φ последовательно несколько раз с увеличивающими промежутками времени и решение о маневре принимать по последним вычислениям Φ .

Полученные результаты, то есть алгоритм определения дистанции по двум галсам и алгоритм определения маневра [1], могут быть взяты за основу для разработки реального алгоритма, учитывающего случайные помехи при измерении пеленга в пассивном режиме.

Для тактической задачи преследования или слежения за целью наиболее перспективным представляется алгоритм определения элементов движения и дистанции по маневрирующей цели при равномерном прямолинейном движении преследователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов, В. Г. Определение координат и параметров движения цели на прямолинейных курсах / В. Г. Борисов, Г. Л. Поляк // Труды Крыловского государственного центра. — 2014. — Вып. 81(365).
2. Баев, А. Д. Теоремы о “следах” для одного класса псевдодифференциальных операторов с вырождением / А. Д. Баев, Р. А. Ковалевский, М. Б. Давыдова // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2015. — № 2. — С. 63–75.

REFERENCES

1. Borisov V. G., Polyak G. L. Determination of coordinates and motion parameters purposes on straight courses. [Borisov V.G., Polyak G.L. Opredelenie koordinat i parametrov dvizheniya celi na pryamolinejnyx kursax]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo centra — The works of Krylov state center*, 2014, iss. 81(365).
2. Baev A. D., Kovalevsky R. A., Davidova M. B. Theorems about the «trecas» for a class of pseudodifferential operators with degeneracy. [Baev A. D., Kovalevskij R. A., Davydova M. B. Teoremy o “sledax” dlya odnogo klassa psevdodifferencial’nyx operatorov s vyrozhdeniem]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2015, no. 2, pp. 63–75.

Поляк Г. Л., Институт проблем управления РАН имени В. А. Трапезникова, Москва, Россия

Polyak G. L., Institute of control Sciences named after V. A. Trapeznikova, Moscow, Russia