

© Каплицкий В.Н., Кашеев Н.А., Чаплинский В.С.  
Kaplitsky V., Kascheev N., Chaplinsky V.

## МЕТОД И МОДЕЛЬ ПАССИВНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО НАВЕДЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С МОНОИМПУЛЬСНЫМ ПЕЛЕНГОВАНИЕМ РАДИОИЗЛУЧАЮЩЕЙ ДВУХТОЧЕЧНОЙ ЦЕЛИ

### METHOD AND MODEL OF PASSIVE AUTOMATIC GUIDANCE OF AIRCRAFT WITH SINGLE GIANT PULSE DIRECTION FINDING OF RADIO-EMITTING TWO-POINT TARGET

**Аннотация.** Рассматриваются сценарии сближения самонаводящегося пассивного летательного аппарата, оснащенного амплитудным суммарно-разностным пеленгатором, на наземную двухточечную цель с источниками непрерывного радиоизлучения. Представлен метод и основные принципы наведения, положенные в основу создания реализующей его имитационной статистической модели движения летательного аппарата по всей трассе полета до цели для двух вариантов наземных источников радиоизлучения – с некоррелированными и когерентными сигналами.

**Annotation.** We consider the scenarios of passive homing flying machine equipped with an amplitude sum-and-difference direction finder for the ground two-point target with continuous source of radio emission. A method and the basic principles of guidance the principles underlying the establishment of implementing statistical simulation model of the aircraft throughout the flight path to the target for the two variants of terrestrial radio sources with uncorrelated and coherent signals are presented.

**Ключевые слова.** Летательный аппарат, самонаводящееся специальное средство, ложный источник.

**Key words.** Aircraft, homing attack weapons, false source.

Предложенный метод и реализующая его имитационная статистическая модель движения летательного аппарата (специализированного самонаводящегося средства – СПС) на наземную двухточечную радиоизлучающую цель разработаны с практической направленностью создания и применения системы увода (СУВ) СПС от прикрываемого объекта (ПО). Прообразом прикрываемых объектов с непрерывным радиоизлучением могут служить перевозимые средства наземных комплексов управления (НКУ) космическими аппаратами (КА).

Создание СУВ основано на применении ложных источников (ЛИ) излучения как способа постановки имитационных радиопомех пеленгатору СПС. Двухточечная цель (СУВ в составе двух источников радиоизлучения) может быть организована из двух ЛИ, прикрывающих объект целевого назначения, или из ЛИ и самого объекта.

#### 1. Методы сближения самонаводящегося СПС на наземную двухточечную радиоизлучающую цель

Методы предусматривают игровое взаимодействие системы увода и СПС, в котором каждая сторона реализует наиболее предпочтительные из возможных способы решения поставленных задач.

Критериями пригодности СУВ в виде двухточечной цели, очевидно, могут быть неравенства

$$P_{\text{П1}} \leq P_{\text{П10}}; P_{\text{П2}} \leq P_{\text{П20}}$$

где  $P_{\text{П1}}, P_{\text{П2}}$  – вероятности нарушения функционирования первого и второго источника двухточечной цели в результате однократного воздействия СПС;

$P_{\text{П10}}, P_{\text{П20}}$  – допустимые значения этих вероятностей.

Для всех возможных вариантов создания системы увода СПС с использованием ЛИ увод СПС от прикрываемого целевого объекта имеет безусловный приоритет.

СПС решает задачу нарушения функционирования

Каплицкий Виктор Николаевич – главный научный сотрудник «НИИ КС имени ААМаксимова» – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева», тел. (495) 566-34-09;

Кашеев Николай Александрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник «НИИ КС имени ААМаксимова» – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева», тел. 502-83-43;

Чаплинский Владимир Степанович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник «НИИ КС имени ААМаксимова» – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева», тел. 502-83-40.

Kaplitsky Victor – senior researcher, AAMaksimov Space Systems Research Institute; tel. (496) 566-34-09;

Kascheev Nikolai – doctor of technical sciences, senior researcher, AAMaksimov Space Systems Research Institute; tel. 502-83-43;

Chaplinsky Vladimir – doctor of technical sciences, senior researcher, AAMaksimov Space Systems Research Institute; tel. 502-83-40.

ния одного из источников с максимальной вероятностью. Нарушение функционирования двух источников одним СПС предполагается невозможным и обеспечивается их территориальным разномом. Событие нарушения функционирования одного из источников состоит в достижении СПС критической зоны сближения, определяемой характеристиками СУв и характеристиками СПС.

Наиболее адекватным методом оценки вероятностей  $P_{п1}$  и  $P_{п2}$  представляется метод имитационного статистического моделирования движения СПС на наземную двухточечную радиоизлучающую цель на всей трассе его полета.

При наведении на двухточечную цель при близких характеристиках сигналов, принимаемых пеленгатором СПС (одного из основных определяющих условий обеспечения неразличимости источников), отличительными признаками этих сигналов могут быть амплитудные и фазовые соотношения, используемые при реализации в СПС моноимпульсного (амплитудного суммарно-разностного) способа пеленгации.

Амплитудный суммарно-разностный способ пеленгации одиночной цели для одной угловой координаты (на плоскости) основан на симметричном смещении основного лепестка диаграммы направленности антенны пеленгатора на угол  $\varepsilon$  в обе стороны от равносигнального направления (РСН).

Принцип функционирования моноимпульсного (амплитудного суммарно-разностного) пеленгатора при наведении на одиночную цель на плоскости иллюстрируется на рис. 1.

$$\frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} = \frac{G_1 - G_2}{G_1 + G_2} \quad (1)$$

принято в качестве дискриминационной характеристики, где  $G_1 = G(+\varepsilon)$ ,  $G_2 = G(-\varepsilon)$  – диаграммы направленности антенны, смещенные соответственно на  $+\varepsilon$  и  $-\varepsilon$  относительно РСН.

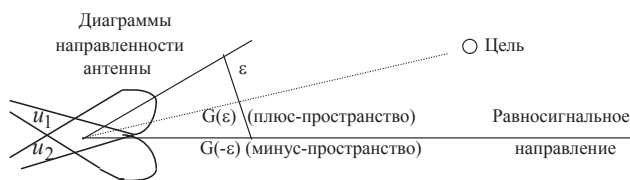


Рис. 1. Принцип функционирования моноимпульсного (амплитудного суммарно-разностного) пеленгатора при наведении на одиночную цель на плоскости (для одной угловой координаты):  $u_1, u_2$  – сигналы на выходе облучателей

В выражении (1) в результате нормировки дискриминационная характеристика определяется формой основного лепестка диаграммы направленности ан-

тенны пеленгатора и величиной  $\pm\varepsilon$  смещения основного лепестка относительно РСН, но не амплитудой сигнала. Оптимальной величиной смещения определен угол  $\varepsilon_{опт} \approx 0,6\xi$ , где  $\xi$  – ширина основного лепестка диаграммы направленности на уровне половинной мощности (угол  $\varepsilon_{опт}$  соответствует максимуму крутизны диаграммы направленности). Возможные варианты пеленгования двухточечной цели на плоскости схематично представлены на рис. 2–4.

На рис. 2 представлена схема взаимного расположения СПС и источников двухточечной цели, где  $L$  – база (расстояние между источниками радиоизлучения);  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  – сигналы на входе пеленгатора от первого и второго источников соответственно;  $\Delta$  – угловое расстояние от пеленга  $\theta$  середины базы до одного из источников.

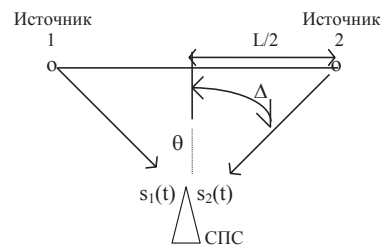


Рис. 2. Схема пеленгования двухточечной цели при движении СПС по нормали к середине базы

Эта схема может быть использована и для анализа трехмерного движения СПС, поскольку угол между земной поверхностью и направлением полета СПС предполагается сравнительно малым, практически не влияющим на результаты динамики движения СПС на плоскости, образуемой объектами «Источник 1 – Источник 2 – СПС».

На рис. 3 расчетная база по сравнению с рис. 2 уменьшается пропорционально  $\cos(\alpha)$ , соответственно,  $\Delta_1 = \Delta_2 = D \cos(\alpha)$ , где  $\alpha$  – угол отклонения от нормали к середине базы.

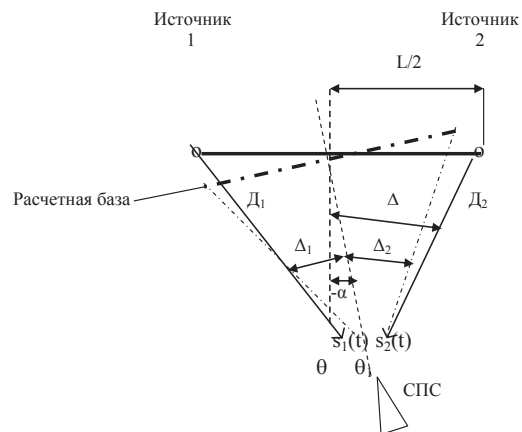


Рис. 3. Схема пеленгования двухточечной цели при отклонении исходного направления полета СПС от нормали к середине базы

Изменению в этом варианте подвергаются и амплитуды сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  за счет изменения дальностей распространения радиоволн (при  $\alpha=0, D_1/D_2=1$ , при  $\alpha < 0, D_1/D_2 > 1$ , при  $\alpha > 0, D_1/D_2 < 1$ ).

При произвольных направлениях сближения СПС с двухточечной целью, реализуемых в основном на завершающих этапах полета, исключающих пеленг середины базы, схема пеленгования иллюстрируется на рис. 4.

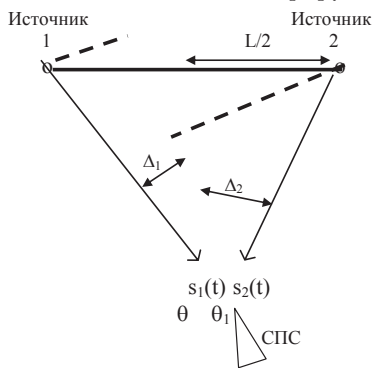


Рис. 4. Схема пеленгования двухточечного источника радиоизлучений при произвольных направлениях движения ЛА

На основании анализа возможных схем пеленгования двухточечной цели можно выделить следующие отличительные признаки этапов сближения СПС с целью:

- начальный этап при пуске СПС с больших дальностей, когда двухточечная цель воспринимается пеленгатором СПС как одиночный объект;
- этап сближения с целью после различения источников излучения с наведением СПС согласно схемам на рис. 2 или рис. 3;
- завершающий этап полета СПС при выборе и сближении с одним из источников радиоизлучения.

На начальном этапе пеленгатор использует дискриминационную характеристику, определяемую выражением (1), воспринимая цель как одиночный объект. При различении источников двухточечной цели (рис. 2 или рис. 3) дискриминационная характеристика пеленгатора должна быть изменена, в противном случае СПС будет продолжать движение с пеленгом на середину базы и соответственно приведет к промаху.

Рассмотрим в этом плане движение СПС в поле двух источников, представленных на рис. 2.

Для различимой двухточечной цели, когда источник 1 находится в плюс-пространстве, а источник 2 – в минус-пространстве (рис. 1), при исходном пеленге  $\theta$  по нормали к середине базы источники радиоизлучений формируют в пеленгаторе противоположные по знаку ошибки наведения. При разделении этих пространственных областей по знаку ошибки формируются сле-

дующие напряжения:

- на выходе облучателей

$$u_1 = [s_1(t) + s_2(t)]G_1; \quad u_2 = [s_1(t) + s_2(t)]G_2; \quad (2)$$

- суммарный нормирующий сигнал приобретает вид

$$u_1 + u_2 = [s_1(t) + s_2(t)](G_1 + G_2);$$

- сигнал, несущий информацию об абсолютном значении и знаке ошибки пеленга формирует разность напряжений

$$u_1 - u_2 = [s_1(t) - s_2(t)](G_1 - G_2). \quad (3)$$

Отношение  $(u_1 - u_2)/(u_1 + u_2)$  с учетом (2) и (3) определяется следующим выражением:

$$\frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} = \frac{s_1(t) - s_2(t)}{s_1(t) + s_2(t)} \cdot \frac{G_1 - G_2}{G_1 + G_2}, \quad (4)$$

в котором первый множитель является информационным при наведении на двухточечную цель, второй – при наведении на одиночную цель, интерпретируемую как неразличимые два объекта. Выражение (4) равно нулю при движении СПС по равносигнальному направлению ( $G_1 = G_2$ ) и при равенстве сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ .

Полученное выражение (4) определяет необходимость формирования на СПС двух дискриминационных характеристик пеленгатора в виде первого и второго сомножителя этого выражения.

Первый сомножитель может быть преобразован к виду

$$f(\kappa) = \frac{s_1(t) - s_2(t)}{s_1(t) + s_2(t)} = \frac{s_1(t) - s_2(t)}{s_1(t) + s_2(t)} \cdot \frac{s_1(t) + s_2(t)}{s_1(t) + s_2(t)} = \frac{1 - k^2}{1 + k^2 + 2k\rho}, \quad (5)$$

где  $k = S_2/S_1$  – отношение амплитуд сигналов  $s_2(t)$  и  $s_1(t)$ ;  $\rho$  – коэффициент взаимной корреляции этих сигналов, и принят в качестве дискриминационной характеристики пеленгатора двухточечной цели.

При вычислении функции  $f(\kappa)$  на основе радиометрических измерений в соответствии с выражениями (2) и (4) второй сомножитель в выражении (4) должен быть принят равным единице.

С учетом (5) оценка пеленга на нормали к базе, проходящей через ее середину, определяется выражением, приведенном в работе [1]

$$\hat{\theta} = \theta + \Delta f(\kappa). \quad (6)$$

Для некоррелированных непрерывных сигналов (типа шумоподобных [2], применяемых в средствах управления КА)  $\rho = 0$ . Для таких сигналов из выражений (5), (6) следует, что при  $\kappa = 0$   $\hat{\theta} = \theta + \Delta$ , при  $\kappa = \infty$   $\hat{\theta} = \theta - \Delta$  (предельные случаи, характеризующие одиночную цель). При промежуточных значениях величины  $\kappa$  оценка пеленга смещается в сторону более мощного сигнала, но

никогда не выходит за пределы базы. Оценка пеленга не смещается при  $k=1$  и соответствует пеленгу по нормали на середину базы.

В табл. 1 приведены некоторые значения функции  $f(k)$  при  $\rho=0$ .

Таблица 1

Значения функции  $f(k)$  при  $\rho=0$

k	0	0,1	0,5	1	2	5	10	20	$\infty$
f	1	0,98	0,6	0	-0,6	-0,92	-0,98	-0,995	-1

На первом этапе движения СПС в соответствии с проведенными оценками предполагается, что функция  $f(k)$  по модулю равна единице. По мере дальнейшего движения СПС проверяется соответствие этого предположения путем постоянного или эпизодического вычисления функции  $f(k)$  на основе реальных измерений. В случае несоответствия пеленгатор должен использовать критерий различимости сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ , который можно представить в виде

$$f(k) < r, \tag{7}$$

где  $r < 1$  – пороговое значение принятия решения о сближении с двухточечной целью, и далее использовать дискриминационную характеристику (5).

Для когерентных сигналов  $\rho = -\cos(\varphi)$ , а оценка пеленга согласно (6) определяется соотношением

$$\hat{\theta} = \theta + \Delta \frac{1 - k^2}{1 + k^2 - 2k \cos \varphi} = \theta + \Delta f_k(k), \tag{8}$$

где  $\varphi$  – разность фаз между сигналами  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ , отсчитываемая от противофазного состояния сигналов.

Некоторые значения функции  $f_k(k)$  для когерентных сигналов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения функции  $f_k(k)$  для когерентных сигналов

k	0	0,1	0,5	1	2	5	10	20
$\varphi=0^\circ$	1	1,22	3	0	-3	-1,5	-1,22	-1,11
$\varphi=30^\circ$	1	1,83	1,97	0	-1,97	-1,39	-1,84	-1,09

Из табл. 2 следует, что пеленг выражения (8) может выходить за пределы базы, что кардинально позволяет решить вопрос увода СПС от обоих источников радиоизлучения двухточечной цели.

## 2. Принципы построения имитационной статистической модели

Принципы построения имитационной статистической модели сформулированы и иллюстрируются на основе решения конкретных прикладных задач. В модели задачи сближения СПС с целью решаются последовательно в соответствии с текущим временем полета

СПС. Шаг квантования времени определяется исходными данными модели. На каждый момент текущего времени определяются координаты СПС и направление пеленга на цель вплоть до падения СПС с определением факта вхождения в критическую зону одного из источников радиоизлучения или промаха. Статистическая устойчивость результатов оценок достигается имитацией  $R_M$  реализаций, отличающихся составом и числовыми значениями случайных факторов.

### Основные результаты моделирования

1. Сигналы некоррелированные. Ложные источники размещаются симметрично относительно прикрываемого объекта по окружности с определенным радиусом.

На первом этапе полета СПС используется дискриминационная характеристика для наведения на одиночную цель. При сближении с целью СПС оказывается в зоне действия двух ближайших ЛИ, окружающих прикрываемый объект. Схема сближения в силу симметричности расстановки ЛИ вокруг прикрываемого объекта примерно соответствует рис. 2.

При равных мощностях излучаемых ЛИ сигналов (предпочтительная тактика СУв) сближение СПС с двухточечной целью до конца его полета продолжается по направлению на середину базы [выражение (5)], что определяет математическое ожидание точки падения СПС (середина базы) и обеспечивает решение задач СУв. Отклонения от середины базы возможны при флуктуациях мощностей ЛИ или принудительно по заранее заложенной на СПС программе с переходом на поиск и выбор одиночной цели в ближней зоне. В этих случаях нарушение работоспособности одного из ЛИ возможно (вероятность этого события определяется по результатам моделирования с учетом использования различных технологических режимов, например, «мерцательного» излучения ЛИ).

2. Сигналы когерентные. Ложный источник один, отстоит от прикрываемого объекта на расстоянии, обеспечивающем его безопасность при применении ЛИ.

При значительном превышении энергетических характеристик ЛИ по отношению к соответствующим характеристикам ПО (~ 10 раз) и использовании некоррелированных сигналов этих источников радиоизлучения СПС неизбежно в качестве поражаемой одиночной цели выберет ЛИ, что следует из табл. 1. Поэтому применение когерентных сигналов представляется целесообразным только по отношению к защите одиночного ЛИ.

Предлагается схема вертикального размещения на ЛИ источников радиоизлучения с когерентными сигналами (рис. 5).

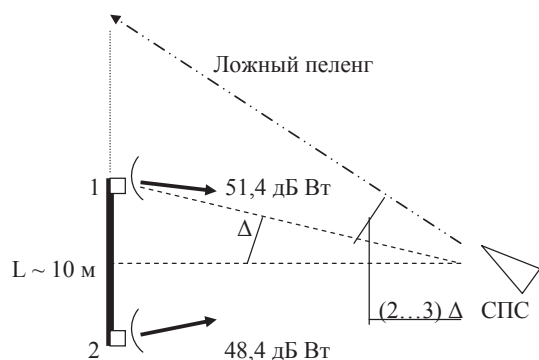


Рис. 5. Схема вертикального размещения на ЛИ источников радиозлучения с когерентными сигналами

Приведенные на рис. 5 значения эффективной изотропно излучаемой мощности источников излучения получены исходя из обеспечения необходимости превышения излучаемой мощности ЛИ по отношению к при-

крываемому объекту в  $\sim 10$  раз.

В соответствии с данными табл. 2 для того, чтобы пеленг при сближении с двухточечной целью с когерентными сигналами выходил за пределы базы ( $2...3\Delta$ ), необходимо соотношение мощностей передатчиков  $\sim 2$  (на рис. 5 разница мощностей 3 дБ). При величине  $\Delta$  (рис. 2), определяемой, например, половиной базы – 5 м и расстоянием до СПС в ближней зоне, ложный пеленг будет гарантировать пролет СПС над базой на расстоянии 10...15 м (высота полета СПС – 20...25 м). Поскольку угол над земной поверхностью движения СПС в ближней зоне близок к нулю, то такой вынужденный «маневр» должен обеспечить удаление СПС более, чем на 100 м. Вероятностные характеристики могут быть определены адекватным моделированием этого сценария с последующим натурным экспериментом.

#### Литература

1. Леонов А.И. и др. Моноимпульсная радиолокация. / Радио и связь, 1984.
2. Кащеев Н.А. Радиотехнические средства управления космическими аппаратами. / Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)» – М., 2005. – 202 с.

Материал поступил в редакцию 29. 12. 2012 г.