

# Радиолокационные и радионавигационные системы

DOI 10.24412/2221-2574-2022-3-18-29

УДК 621.396.962.38; 621.396.969.32

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ЛИНИЙ РАВНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ЧАСТОТ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ РЛС

**Воронцова Светлана Анатольевна**

инженер кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств (КТЭСиУ), ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» (Самарский университет).

E-mail: [cbeta116@mail.ru](mailto:cbeta116@mail.ru)

Адрес: 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

*Аннотация:* Существующие методы расчёта величины элемента разрешения не являются универсальными и имеют существенные недостатки в плане точности расчёта, отсутствия учёта конфигурации элемента разрешения, подходят не для любого положения элемента разрешения в зоне обзора. Требуемую точность можно получить с помощью метода, основанного на уравнениях линий равных доплеровских частот. В работе рассмотрено формирование линий равных доплеровских частот (изодоп) двухпозиционной радиолокационной станции (РЛС). Они образуются из точек пересечения линий равных доплеровских частот, образующихся в результате движения приёмника, и линий равных доплеровских частот, образующихся в результате движения передатчика относительно облучаемого участка земной поверхности. Причём таких, что сумма соответствующих им доплеровских частот является величиной постоянной и равной результирующей частоте Доплера сигнала, поступающего на вход приёмника двухпозиционной РЛС. На основе принципа формирования линий равных доплеровских частот двухпозиционной радиолокационной станции разработан алгоритм их построения, учитывающий параметры геометрии взаимного расположения приёмника и передатчика двухпозиционной радиолокационной станции.

*Ключевые слова:* линия равных доплеровских частот, двухпозиционная радиолокационная станция, алгоритм, база, высота, элемент разрешения, земная поверхность.

### Введение

Мощность отражений от подстилающей поверхности в значительной степени определяет отношение сигнала к шуму на входе приёмника бортовой радиолокационной станции (РЛС) и, как следствие, вероятность правильного обнаружения целей и точность определения их координат. Применение двухпозиционного режима работы радиолокационной станции снижает мощность мешающих отражений за счёт уменьшения количества и площади элементов земной поверхности (являющихся элементами разрешения для случая картографирования), отражающих зондирующий сигнал, попадающий в строб дальности и полосу пропускания доплеровского фильтра. Уменьшение мощности отражений в случае применения двухпози-

ционного режима достигается также за счёт того, что в отличие от случая однопозиционного режима накладывающиеся на один и тот же элемент боковые лепестки диаграмм направленности антенн передатчика и приёмника имеют различное значение коэффициента направленного действия.

Для оценки мощности мешающих отражений от элемента земной поверхности требуется расчёт величины этого элемента. При этом существующие методы расчёта величины элемента разрешения не являются универсальными и имеют существенные недостатки в плане точности расчёта, отсутствия учёта конфигурации элемента разрешения, подходят не для любого положения элемента разрешения в зоне обзора. Требуемую точность можно получить с

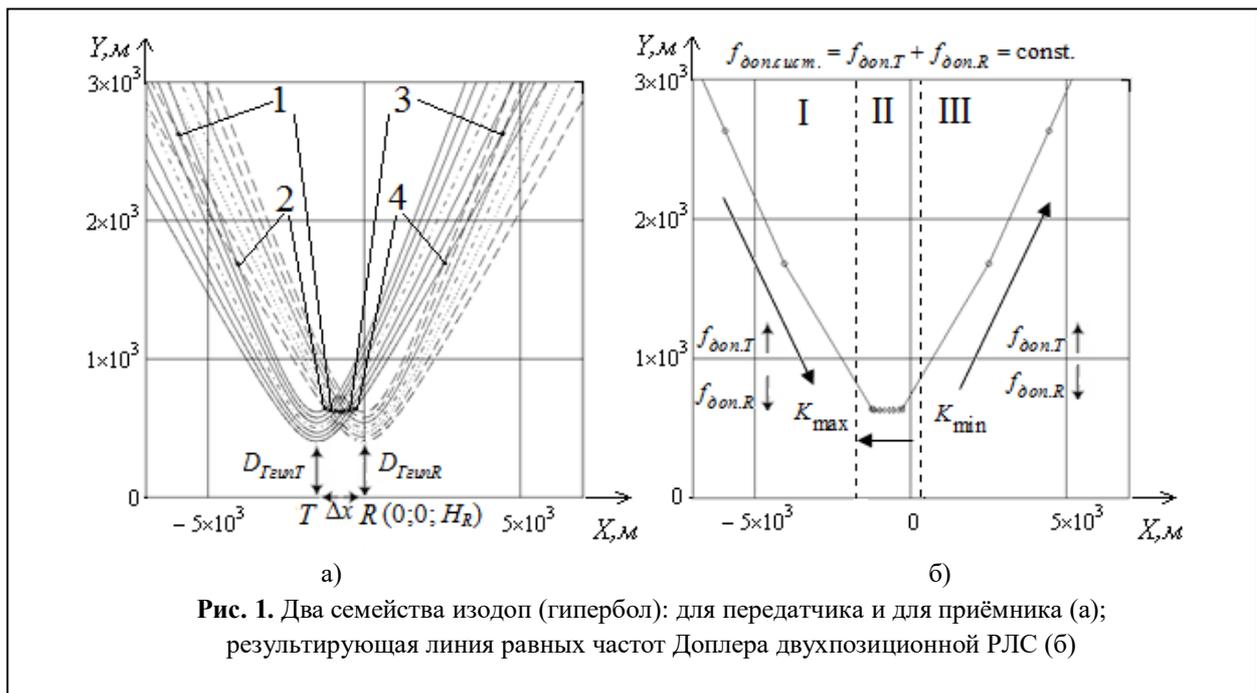


Рис. 1. Два семейства изодоп (гипербол): для передатчика и для приёмника (а); результирующая линия равных частот Доплера двухпозиционной РЛС (б)

помощью метода [1], основанного на уравнениях линий равных доплеровских частот. С этой целью в данной работе разработан алгоритм построения линий равных доплеровских частот (изодоп) двухпозиционной РЛС.

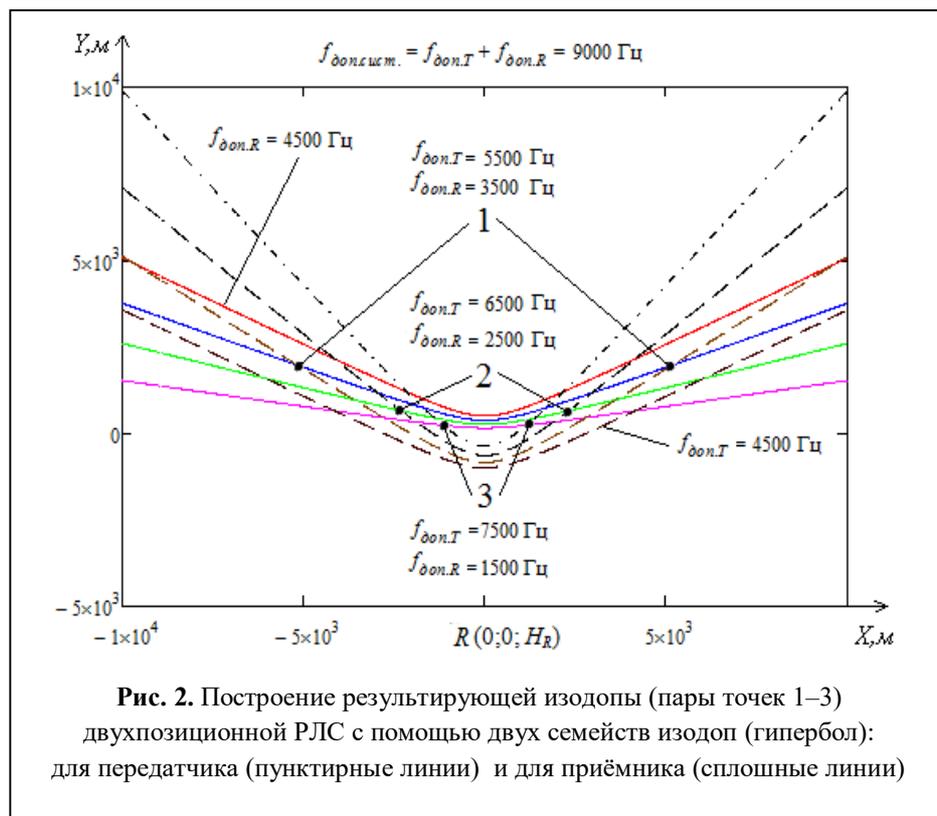
Поверхностями равных доплеровских частот, образующихся в результате движения носителей приёмника (ПРМ) и передатчика (ПРД) радиолокационной станции, являются поверхности конусов с осью симметрии — вдоль вектора скорости носителей станции, и с вершинами в точках расположения носителей [2–6].

Линиями равных доплеровских частот (изодопами) являются сечения этих конусов плоскостью облучаемого участка подстилающей поверхности. Они представляют собой гиперболы (рис. 1). Линии равных доплеровских частот двухпозиционной РЛС формируются из точек пересечения (точки 1–4 на рис. 1) линий равных доплеровских частот, образующихся в результате движения передатчика, и линий равных доплеровских частот, образующихся в результате движения приёмника относительно облучаемой поверхности. Причём таких, что сумма соответствующих им доплеровских частот является величиной постоянной и равной результирующей частоте Доплера сигнала, по-

ступающего на вход приёмника двухпозиционной РЛС ( $f_{\text{доп.сум.}} = f_{\text{доп.Т}} + f_{\text{доп.Р}}$ ).

В качестве примера на рис. 1 построена образующаяся в результате пересечения соответствующих изодоп линия равных доплеровских частот двухпозиционной РЛС для случая параллельного движения носителей, направления векторов скорости которых совпадают с направлением оси  $Y$ , при этом высоты полёта носителей передатчика (ПРД) и приёмника (ПРМ)  $H_T = H_R = 1$  км, база  $B = 1,5$  км и результирующая доплеровская частота системы  $f_{\text{доп.сум.}} = 9$  кГц. При этом передатчик располагается в точке  $T$ , а приёмник располагается в точке  $R$  с координатами  $(0; 0; H_R)$ . Если поменять точки  $T$  и  $R$  местами, то результирующий график зеркально отразится по горизонтали. Предполагается, что плоскость  $XU$  совпадает с плоскостью облучаемого участка поверхности Земли, ось  $Y$  соответствует координате «азимут», ось  $X$  соответствует координате «дальность».

В большинстве случаев соответствующие изодопы пересекаются сразу в двух точках (на рис. 1, а — пары точек, отмеченные цифрами 1–4 и на рис. 2 — пары точек, отмеченные цифрами 1–3). Поэтому график изодопы двух-



**Рис. 2.** Построение результирующей изодопы (пары точек 1–3) двухпозиционной РЛС с помощью двух семейств изодоп (гипербол): для передатчика (пунктирные линии) и для приёмника (сплошные линии)

позиционной РЛС (рис. 1) можно условно поделить на три участка (I–III). Положим, что передатчик расположен слева от приёмника, тогда на первом и третьем участках расположены такие точки, значения абсцисс которых возрастают с увеличением частоты Доплера ( $f_{донТ}$ ), возникающей в результате движения передатчика относительно облучаемого участка земной поверхности, и уменьшением частоты Доплера ( $f_{донР}$ ), возникающей в результате движения приёмника относительно облучаемого участка земной поверхности. А на втором участке графика располагаются такие точки, значения абсцисс которых возрастают с уменьшением значения частоты Доплера  $f_{донТ}$  и увеличением частоты Доплера  $f_{донР}$ .

Рассмотрим построение графика изодопы для случая движения носителей РЛС друг за другом. Предположим, что точка расположения носителя приёмника  $R$  имеет координаты  $(0;0;H_R)$ , а точка расположения носителя передатчика  $T$  отстоит на величину  $\Delta y$  в направлении оси  $Y$ . На рис. 2 показано построение изодопы для тех же значений параметров, что и на

рис. 1, но для случая, когда носитель передатчика летит впереди носителя приёмника, при этом  $\Delta y > 0$ . Для случая равных высот носителей при отрицательном значении  $\Delta y$ , то есть, если носитель приёмника летит впереди носителя передатчика, результирующий график опустится на величину  $\Delta y$ .

Для случая движения носителей РЛС друг за другом у результирующего графика изодопы двухпозиционной РЛС будет

существовать только два участка, характеризующиеся свойствами I и II. Первый участок соответствует отрицательным значениям  $X$ , а второй участок — положительным значениям  $X$ .

С учётом особенностей формирования линий равных доплеровских частот двухпозиционной РЛС был разработан алгоритм их построения (рис. 3–5).

#### Алгоритм построения линий равных доплеровских частот двухпозиционной РЛС

1. Задаём значения параметров «геометрии» системы: базы ( $B$ ); высоты полёта носителя приёмника ( $H_R$ ); разности высот полёта летательных аппаратов, являющихся носителями приёмника и передатчика ( $\Delta H = H_R - H_T, |H_R - H_T| < B$ ); длины волны излучаемого сигнала ( $\lambda$ ); скорости полёта летательных аппаратов, являющихся носителями приёмника и передатчика, ( $V_R; V_T$ ); номера доплеровского фильтра и соответствующей изодопы ( $n$ ); шага изменения частоты Доплера

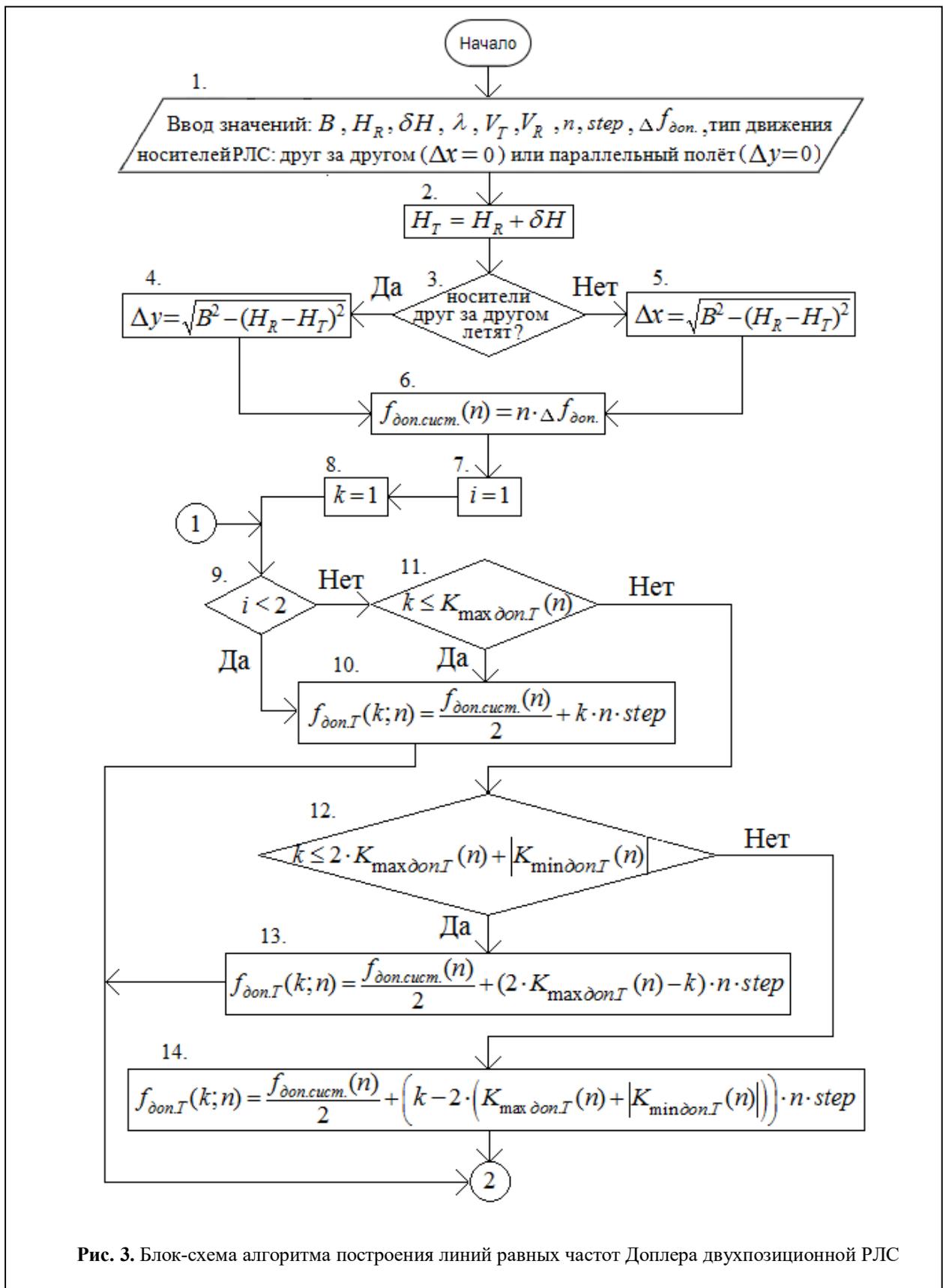


Рис. 3. Блок-схема алгоритма построения линий равных частот Доплера двухпозиционной РЛС

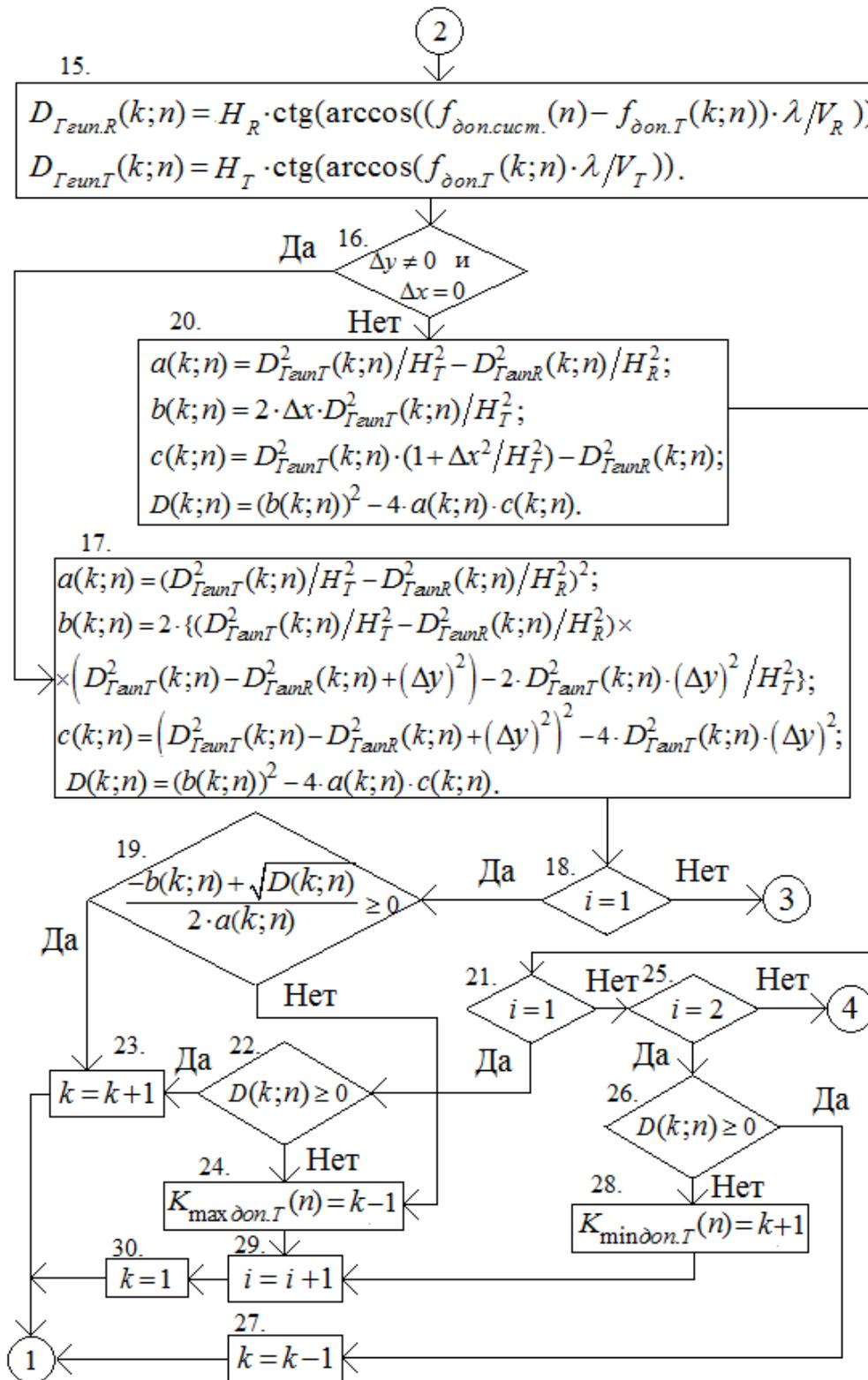


Рис. 4. Продолжение блок-схемы алгоритма построения изодоп двухпозиционной РЛС

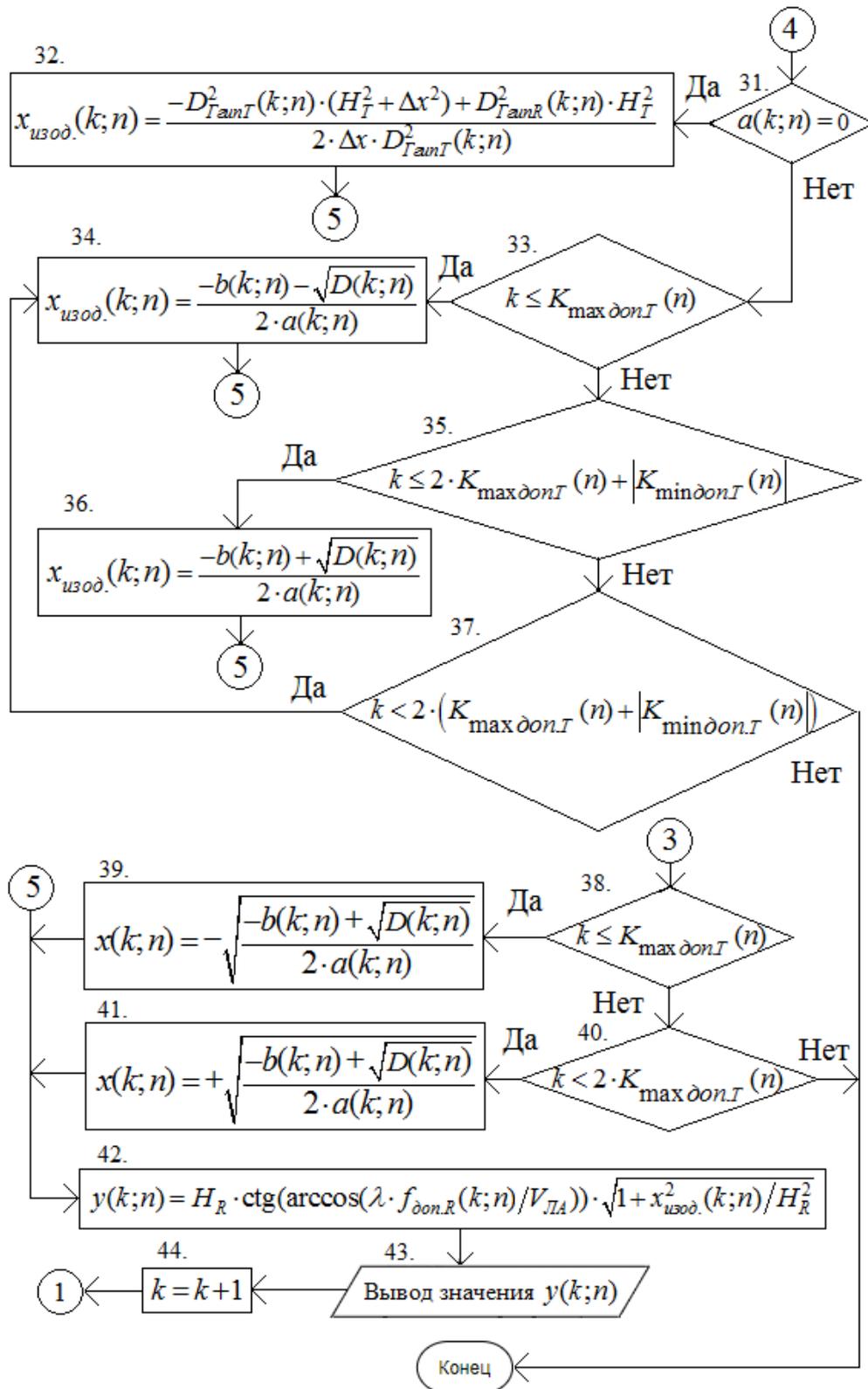


Рис. 5. Продолжение блок-схемы алгоритма построения изодоп двухпозиционной РЛС

(step), возникающей в результате движения передатчика относительно облучаемого участка подстилающей поверхности; ширины полосы пропускания доплеровского фильтра ( $\Delta f_{\text{дон}}$ ); проекции базы на ось  $Y$  для случая параллельного полёта носителей в направлении оси  $Y$  ( $\Delta y = 0$ ) либо проекции базы на ось  $X$  для случая полёта носителей друг за другом в направлении оси  $Y$  ( $\Delta x = 0$ ), при этом предполагается, что плоскость  $XY$  располагается параллельно поверхности Земли, а начало координат совпадает с положением носителя приёмника.

2. Вычисляем значение: высоты полёта носителя передатчика ( $H_T = H_R + \delta H$ );

3. Выбираем тип полёта носителей РЛС с помощью проверки истинности условия: носители друг за другом летят? Если да, то переходим к выполнению пункта 4, в противном случае переходим к выполнению пункта 5.

4. Вычисляем значение проекции базы на ось  $Y$  для случая полёта носителей друг за другом в направлении оси  $Y$  ( $\Delta y = \sqrt{B^2 - (H_R - H_T)^2}$ ) и далее переходим к пункту 6.

5. Вычисляем значение проекции базы на ось  $X$ : для случая параллельного полёта носителей в направлении оси  $Y$  ( $\Delta x = \sqrt{B^2 - (H_R - H_T)^2}$ ).

6. Выбираем значение частоты Доплера системы ( $\Delta f_{\text{дон.сум.}} = n \cdot \Delta f_{\text{дон}}$ ), то есть значение верхней границы полосы пропускания доплеровского фильтра с номером  $n$ .

7. Задаём порядковый номер разновидности цикла ( $i = 1$ ).

8. Задаём порядковый номер абсциссы графика линии равных доплеровских частот двухпозиционной радиолокационной станции ( $k = 1$ ).

9. Проверяем истинность условия, что номер разновидности цикла ( $i$ ) меньше двух ( $i < 2$ ).

10. В случае истинности условия пункта 9 рассчитываем для номера  $k$  значение частоты Доплера, образующейся в результате движения

передатчика, для получения в дальнейшем абсцисс с номером  $k$  точек, из которых формируются результирующие изодопы с номером  $n$ , по формуле:

$$f_{\text{дон.Т}}(k; n) = \frac{f_{\text{дон.сум.}}(n)}{2} + k \cdot n \cdot \text{step} \quad (1)$$

и далее переходим к выполнению пункта 15.

11. Если условие пункта 9 ложное, то проверяем выполнение следующего условия:

$$k \leq K_{\text{max доп.Т}}(n). \quad (2)$$

В случае выполнения условия (2) пункта 11 переходим к выполнению пункта 10, где рассчитываем частоту Доплера по формуле (1) и далее переходим к выполнению пункта 15. В случае невыполнения условия (2) пункта 11 переходим к выполнению пункта 12.

12. Проверяем истинность следующего условия:

$$k \leq 2 \cdot K_{\text{max доп.Т}}(n) + |K_{\text{min доп.Т}}(n)|. \quad (3)$$

Если условие (3) пункта 12 выполняется, то переходим к пункту 13. Если условие (3) пункта 12 не выполняется, то переходим к пункту 14.

13. Если условие (3) пункта 12 выполняется, то рассчитываем частоту Доплера по формуле:

$$f_{\text{дон.Т}}(k; n) = \frac{f_{\text{дон.сум.}}(n)}{2} + (2 \cdot K_{\text{max доп.Т}}(n) - k) \times \times n \cdot \text{step} \quad (4)$$

и далее переходим к выполнению пункта 15.

14. Если условие (3) пункта 12 не выполняется, то рассчитываем частоту Доплера по формуле:

$$f_{\text{дон.Т}}(k; n) = \frac{f_{\text{дон.сум.}}(n)}{2} + n \cdot \text{step} \times \times \left( k - 2 \cdot \left( K_{\text{max доп.Т}}(n) - |K_{\text{min доп.Т}}(n)| \right) \right). \quad (5)$$

15. Вычисляем параметр гиперболы (линии равных частот Доплера, образующихся в результате движения передатчика относительно облучаемой поверхности), то есть расстояние от проекции точки расположения носителя передатчика  $T$  на поверхность Земли до минимума гиперболы:

$$D_{ГzumT}(k;n) = H_T \times \text{ctg}(\arccos((f_{дон.T}(k;n)) \cdot \lambda / V_{ЛА})). \quad (6)$$

Также вычисляем параметр гиперболы (линии равных частот Доплера, образующихся в результате движения приёмника относительно облучаемой поверхности), то есть расстояние от проекции точки расположения носителя приёмника  $R$  на поверхность Земли до минимума гиперболы:

$$D_{ГzumR}(k;n) = H_R \cdot \text{ctg}(\arccos(f_{дон.сум.}(n) - (f_{дон.T}(k;n) \cdot \lambda / V_{ЛА}))). \quad (7)$$

16. Проверяем истинность условия:  $\Delta y \neq 0$  и  $\Delta x = 0$ . Если истина, то есть если тип полёта носителей — друг за другом, то переходим к выполнению пункта 17, в противном случае, то есть при параллельном типе полёта носителей, переходим к выполнению пункта 20.

17. Рассчитываем значения параметров и дискриминанта биквадратного уравнения, где в качестве неизвестной выступает абсцисса результирующей изодопы двухпозиционной РЛС ( $x_{изод.}$ ):

$$\begin{aligned} a(k;n) &= (D_{ГzumT}^2(k;n)/H_T^2 - D_{ГzumR}^2(k;n)/H_R^2)^2, \\ b(k;n) &= 2 \cdot \{(D_{ГzumT}^2(k;n)/H_T^2 - D_{ГzumR}^2(k;n)/H_R^2) \times \\ &\times (D_{ГzumT}^2(k;n) - D_{ГzumR}^2(k;n) + (\Delta y)^2) - \\ &- 2 \cdot D_{ГzumT}^2(k;n) \cdot (\Delta y)^2 / H_T^2\}, \\ c(k;n) &= (D_{ГzumT}^2(k;n) - D_{ГzumR}^2(k;n) + (\Delta y)^2)^2 - \\ &- 2 \cdot D_{ГzumT}^2(k;n) \cdot (\Delta y)^2, \\ D(k;n) &= (b(k;n))^2 - 4 \cdot a(k;n) \cdot c(k;n). \end{aligned} \quad (8)$$

18. Проверяем истинность условия, что номер цикла ( $i$ ) равен единице ( $i=1$ ). В случае истинности условия переходим к пункту 19, в случае ложности — к пункту 38.

19. Проверяем истинность условия:

$$\frac{-b(k;n) + \sqrt{D(k;n)}}{2 \cdot a(k;n)} \geq 0. \quad (9)$$

Если истина, то переходим к пункту 23, если ложь, то — к выполнению пункта 24.

20. Рассчитываем значения параметров и дискриминанта квадратного уравнения, где в качестве неизвестной выступает абсцисса ре-

зультирующей изодопы двухпозиционной РЛС ( $x_{изод.}$ ):

$$\begin{aligned} a(k;n) &= D_{ГzumT}^2(k;n)/H_T^2 - D_{ГzumR}^2(k;n)/H_R^2, \\ b(k;n) &= 2 \cdot \Delta x \cdot D_{ГzumT}^2(k;n)/H_T^2, \\ c(k;n) &= D_{ГzumT}^2(k;n) \cdot (1 + \Delta x^2/H_T^2) - D_{ГzumR}^2(k;n), \\ D(k;n) &= (b(k;n))^2 - 4 \cdot a(k;n) \cdot c(k;n). \end{aligned} \quad (10)$$

21. Проверяем истинность условия, что номер цикла ( $i$ ) равен единице ( $i = 1$ ). В случае истинности условия переходим к пункту 21, в случае ложности — к пункту 23.

22. В случае истинности условия пункта 21 проверяем, является ли неотрицательным значение дискриминанта, рассчитанное по формуле (10) в пункте 20:

$$D(k;n) \geq 0. \quad (11)$$

В случае истинности условия (11) переходим к пункту 23, в случае ложности — к пункту 24.

23. В случае истинности условия (9) пункта 19 или условия (11) пункта 22 увеличиваем номер  $k$  на единицу:

$$k = k + 1 \quad (13)$$

и переходим к пункту 9.

24. В случае ложности условия (11) пункта 22 о неотрицательности дискриминанта присваиваем значение  $k - 1$  номеру, соответствующему максимальному значению частоты Доплера, возникающей в результате движения носителя передатчика относительно облучаемого участка подстилающей поверхности. Причём такого, при котором ещё существует точка пересечения линии равных доплеровских частот, образующихся в результате движения приёмника, и линии равных доплеровских частот, образующихся в результате движения передатчика:

$$K_{\max доп.T}(n) = k - 1 \quad (14)$$

и переходим к пункту 27.

25. Проверяем истинность условия, что номер цикла ( $i$ ) равен двум ( $i = 2$ ). В случае истинности условия переходим к пункту 26, в случае ложности — к пункту 31.

26. В случае истинности условия пункта 25 проверяем, является ли неотрицательным зна-

чение дискриминанта, рассчитанное по формуле (10) в пункте 20:

$$D(k;n) \geq 0. \quad (12)$$

В случае истинности условия переходим к пункту 27, в случае ложности – к пункту 28.

27. В случае истинности условия (10) пункта 24 о неотрицательности дискриминанта уменьшаем номер  $k$  на единицу:

$$k = k - 1 \quad (15)$$

и переходим к пункту 9.

28. В случае ложности условия (10) пункта 24 о неотрицательности дискриминанта присваиваем значение  $k + 1$  номеру, соответствующему минимальному значению частоты Доплера, возникающей в результате движения носителя передатчика относительно облучаемого участка подстилающей поверхности. Причём такого, при котором ещё существует точка пересечения линии равных доплеровских частот, образующихся в результате движения приёмника, и линии равных доплеровских частот, образующихся в результате движения передатчика.

$$K_{\min \text{don.T}}(n) = k + 1. \quad (16)$$

29. Переходим к следующей разновидности цикла путём увеличения номера разновидности на единицу:

$$i = i + 1. \quad (17)$$

30. Обнуляем текущее значение номера частоты Доплера, образующейся в результате движения передатчика относительно облучаемого участка земной поверхности, задаём начальное значение номера:

$$k = 1 \quad (18)$$

и переходим к пункту 9.

31. Проверяем истинность условия, что коэффициент при квадратичном члене квадратного уравнения равен нулю:

$$a(k;n) = 0. \quad (19)$$

Если условие пункта 31 истинное, то переходим к пункту 32, если ложное — к 33.

32. Если условие пункта 31 истинное, то есть уравнение не является квадратным, то находим значение абсциссы единственной точ-

ки пересечения изодоп для передатчика и приёмника:

$$x_{\text{изод.}}(k;n) = \frac{1}{2 \cdot \Delta x \cdot D_{\text{ГанТ}}^2(k;n)} \times \left( -D_{\text{ГанТ}}^2(k;n) \cdot (H_T^2 + \Delta x^2) + D_{\text{ГанR}}^2(k;n) \cdot H_T^2 \right) \quad (20)$$

и переходим к пункту 42.

33. Если условие пункта 31 ложное, то проверяем истинность условия:

$$k \leq K_{\max \text{don.T}}(n). \quad (21)$$

Если условие пункта 33 истинное, то переходим к пункту 34, если ложное — к 35.

34. Если условие пункта 33 истинное, то рассчитываем значение абсциссы изодопы:

$$x_{\text{изод.}}(k;n) = \frac{-b(k;n) - \sqrt{D(k;n)}}{2 \cdot a(k;n)} \quad (22)$$

и переходим к пункту 42.

35. Если условие пункта 33 ложное, то проверяем истинность условия:

$$k \leq 2 \cdot K_{\max \text{don.T}}(n) + \left| K_{\min \text{don.T}}(n) \right|. \quad (23)$$

Если условие пункта 35 истинное, то переходим к пункту 36, если ложное — к 37.

36. Если условие пункта 35 истинное, то вычисляем значение абсциссы изодопы:

$$x_{\text{изод.}}(k;n) = \frac{-b(k;n) + \sqrt{D(k;n)}}{2 \cdot a(k;n)} \quad (24)$$

и переходим к пункту 42.

37. Если условие пункта 35 ложное, то проверяем истинность условия:

$$k < 2 \cdot \left( K_{\max \text{don.T}}(n) + \left| K_{\min \text{don.T}}(n) \right| \right). \quad (25)$$

Если условие пункта 37 истинное, то переходим к пункту 34, если ложное, то — к концу.

38. Если условие пункта 18 ложное, то проверяем истинность условия:

$$k \leq K_{\max \text{don.T}}(n). \quad (26)$$

Если условие пункта 38 истинное, то переходим к пункту 39, если ложное, то — к 40.

39. Если условие пункта 38 истинное, то рассчитываем значение абсциссы изодопы:

$$x_{изод.}(k;n) = -\sqrt{\frac{-b(k;n) + \sqrt{D(k;n)}}{2 \cdot a(k;n)}} \quad (27)$$

и переходим к пункту 42.

40. Если условие пункта 38 ложное, то проверяем истинность условия:

$$k \leq 2 \cdot K_{\max доп.Т}(n). \quad (28)$$

Если условие пункта 40 истинное, то переходим к пункту 41, если ложное, то — к концу.

41. Если условие пункта 40 истинное, то вычисляем значение абсциссы для точки изодопы:

$$x_{изод.}(k;n) = \sqrt{\frac{-b(k;n) + \sqrt{D(k;n)}}{2 \cdot a(k;n)}} \quad (29)$$

и переходим к пункту 42.

42. Рассчитываем значение ординаты точки с номером  $k$   $n$ -го графика изодопы двухпозиционной РЛС:

$$y(k;n) = H_R \cdot \text{ctg}(\arccos(\frac{\lambda}{V_{ЛД}} \cdot (f_{дон.сум.}(n) f_{дон.Т}(k;n)))) \times \sqrt{1 + x_{изод.}^2(k;n) / H_R^2}. \quad (30)$$

43. Выводим значение ординаты точки с номером  $k$  для построения  $n$ -го графика изодопы двухпозиционной РЛС.

44. Увеличиваем номер  $k$  на единицу:

$$k = k + 1 \quad (31)$$

и переходим к пункту 9.

#### Описание алгоритма построения линий равных доплеровских частот двухпозиционной РЛС

При  $i = 1$  используем первую разновидность цикла – разновидность, предназначенную для нахождения номера  $K_{\max доп.Т}(n)$  частоты Доплера передатчика (рис. 1, б), соответствующего максимальному её значению, при котором ещё существуют точки пересечения линии равных доплеровских частот (изодопы), образующейся в результате движения приёмника, и изодопы, образующейся в результате движения передатчика относительно облучаемой поверхности.

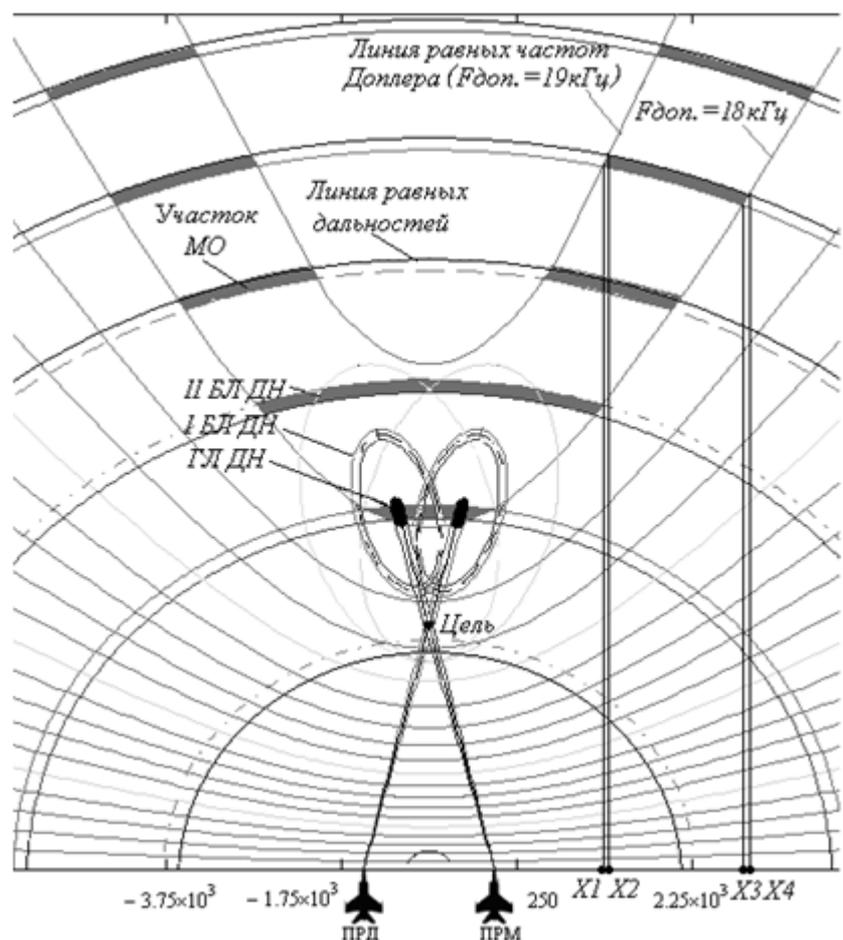
При  $i = 2$  для случая параллельного полёта носителей РЛС используем вторую разновидность цикла – разновидность, предназначенную для нахождения номера  $K_{\min доп.Т}(n)$ , соответствующего минимальному значению частоты Доплера, возникающей в результате движения передатчика, при котором ещё существуют точки пересечения изодопы, образующейся в результате движения приёмника, и изодопы, образующейся в результате движения передатчика относительно облучаемой поверхности.

При  $i = 2$  для случая движения носителей РЛС друг за другом и при  $i = 3$  для случая параллельного полёта носителей РЛС используем третью разновидность цикла. Здесь, рассчитывая частоты Доплера, образующиеся в результате движения передатчика, мы присваиваем им новую нумерацию для того, чтобы с возрастанием номера частоты Доплера значение соответствующей абсциссы результирующего графика изодопы увеличивалось.

Для случая движения носителей РЛС друг за другом нумерацию заменяем на новую нумерацию следующим образом. Частоту Доплера пошагово увеличиваем до значения, соответствующего номеру  $K_{\max доп.Т}(n)$  в предыдущей нумерации, а затем пошагово уменьшаем до исходного значения, при этом новый номер  $k$  увеличивается на единицу на каждом шаге.

Для случая параллельного полёта нумерацию заменяем на новую следующим образом. Частоту Доплера пошагово увеличиваем до значения, соответствующего номеру  $K_{\max доп.Т}(n)$  в предыдущей нумерации, а затем пошагово уменьшаем до исходного значения и продолжаем уменьшать вплоть до значения, соответствующего номеру  $K_{\min доп.Т}(n)$ . Затем снова начинаем пошагово увеличивать до исходного значения, при этом новый номер  $k$  увеличивается на единицу на каждом шаге.

На рис. 6 изображены построенные по полученным формулам графики линий равных доплеровских частот для 19 доплеровских фильтров с полосой пропускания  $\Delta f = 1 \text{ кГц}$  при



**Рис. 6.** Семейства графиков изодоп, построенные по разработанному алгоритму, и линий равных дальностей двухпозиционной РЛС (здесь БЛ ДН – боковой лепесток диаграммы направленности, ГЛ – главный лепесток, участок МО – участок мешающих отражений (элемент разрешения))

следующих значениях параметров: высота полёта носителей  $H_R = H_T = 2$  км; база  $B = 1,5$  км; длина волны  $\lambda = 0,03$  м; скорость полёта носителей  $V_{ЛА} = 300$  м/с.

Также на рис. 6 в качестве примера изображены построенные по полученным формулам линии равных дальностей при следующих значениях параметров: длительность зондирующего импульса  $\tau_u = 1$  мкс; период повторения импульсов  $T_n = 10$  мкс; максимальная дальность 100 км.

На рис. 6 показаны направления главных лепестков (ГЛ) и двух ближайших боковых лепестков (БЛ) диаграмм направленности (ДН) ПРМ и ПРД, следы на земле ГЛ и БЛ1, ограниченные по уровню минус 3дБ. Серым цветом

выделены участки МО, сигнал от которых попадает в фильтр, соответствующий частоте Доплера 18 кГц, так как именно в этот фильтр будет поступать наиболее мощный сигнал по ГЛ ДН.

### Заключение

Построение линий равных доплеровских частот (изодоп) двухпозиционной радиолокационной станции совместно с линиями равных дальностей даёт возможность рассчитать площадь элемента разрешения [1] с учётом его конфигурации, что позволяет повысить точность расчётов по сравнению с существующими методами [7–13], например, методом градиента. Также в уравнениях изодоп учитываются параметры взаимного расположения передатчика и приём-

ника, что даёт возможность при расчёте площади элемента разрешения учитывать их влияние на величину элемента разрешения. Разработанный алгоритм построения линий равных частот Доплера подходит как для случая движения носителей РЛС друг за другом, так и для параллельного полёта носителей, предусмотрена возможность изменения таких параметров «геометрии» системы как: высота полёта носителей приёмника и передатчика, при этом высота полёта носителя приёмника может отличаться от высоты полёта носителя передатчика; базы (расстояния между носителем передатчика и носителем приёмника), а также длины волны и скоростей полёта носителей передатчика и приёмника, при этом скорости носителей могут отличаться.

#### Литература

1. Воронцова С.А. Геометрия элемента разрешения двухпозиционной РСА // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. №1. С. 62–66.
2. Дудник П.И., Ильчук А.Р., Татарский Б. Г. Многофункциональные радиолокационные системы. М.: Дрофа, 2007. 283 с.
3. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба [и др.]. М.: Радиотехника, 2010. 675 с.

4. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение (Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли). М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
5. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2015. 440 с.
6. Скольник М.И. Справочник по радиолокации. М.: Техносфера, 2014. Т. 2. 680 с.
7. Moccia A., Chiacchio N., Capone A. Spaceborne bistatic synthetic aperture radar for remote sensing applications // Remote Sensing. 2000. Vol. 21, Iss. 18. Pp. 3395–3414.
8. Honghui Yan, Yanfei Wang, Hui Yu, Bingchen Zhang. Analysis of Geometry Resolution Characteristics of Formation flying Satellites Bistatic SAR // Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences. 2004. Pp. 1–4.
9. Krieger G., Fiedler H., Hounam D., Moreira A. Analysis of system concepts for Bi- and Multi-Static SAR missions // IGARSS. 2003. Iss. 2. Pp. 770–772.
10. Ziyue Tang, Shourong Zhang. Principle of Bistatic SAR System // Science Publishing Company. 2003. Pp. 31–40.
11. Homer J., Kubic K., Mojarrabi B., Lex A. Passive bistatic radar sensing with LEOS based transmitters // IGARSS. 2002. Iss. 1. Pp. 438–440.
12. Davies D. E. N. Use of bistatic radar techniques to improve resolution in the vertical plane // Electronics Letters. 1968. Vol. 4. Pp. 170–171.
13. Jackson M.C. The geometry of bistatic radar systems // IEE Proc. 1986. Dec. Vol. 133. Part F. No. 7. Pp. 604–612.

Поступила 12 апреля 2022 г.

English

## METHODS FOR CONSTRUCTING LINES OF EQUAL DOPPLER FREQUENCIES OF BISTATIC RADAR

**Svetlana Anatolyevna Vorontsova** — Engineer, Design and Technology of Electronic Systems and Devices Department, Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education "Samara National Research University named after S.P. Korolyov" (Samara University).

E-mail: [cbeta116@mail.ru](mailto:cbeta116@mail.ru)

Address: 443086, Russian Federation, Samara, Moscow Highway, 34.

**Abstract:** Monostatic radars came to the end of their resources in terms of efficiency parameters. And further even inappreciable enhancement of any system parameters in monostatic radar involves unreasonably heavy expenses of financial and material resources and, as a rule, results in degradation of other system parameters. Bistatic radar application for radar detection is currently the primary way to improve performance of synthetic aperture radar (SAR). We can make a conclusion on controllability of resolution element size in view of geometry pattern of bistatic radars. With that in mind, identifying parameters and analysing their influence on mutual arrangement of bistatic radar carriers in regard to resolution element value are highly relevant tasks. The current methods to calculate resolution element value are not cross-functional and have significant drawbacks when it comes to calculation accuracy and lack of consideration for resolution element pattern, and these methods are not suitable for any position of resolution element in coverage area. The required accuracy can be obtained via the method based on equations of lines of equal doppler frequencies. The

paper examines forming lines of equal Doppler frequencies (isodopes) of bistatic SAR (synthetic aperture radar). They are formed using intersection points of lines of equal Doppler frequencies resulted from the receiver's movement and the lines of equal Doppler frequencies formed as a result of the transmitter's movement with respect to irradiated area of the earth surface. Moreover, they are such that the sum of their corresponding Doppler frequencies is a constant value of equal to resultant Doppler frequency of the signal coming into the receiver input of bistatic SAR. Algorithm for constructing lines of equal Doppler frequencies of bistatic radar is developed based on their formation principle and there are taken into account geometrical pattern parameters of relative position of the receiver and transmitter in bistatic radar.

**Keywords:** line of equal Doppler frequencies, bistatic radar, algorithm, base, height, resolution element, Earth surface.

### References

1. *Vorontsova S.A.* Geometry of the resolution element of a two-position RSA. Radioengineering and telecommunication systems. 2019. No. 1. Pp. 62–66.
2. *Dudnik P.I., Ilchuk A.R., Tatarsky B. G.* Multifunctional radar systems. Moscow: Drofa, 2007. 283 p.
3. Radar systems of space-based earth survey. *V.S. Verba* [et al.]. Moscow: Raditehnika, 2010. 675 p.
4. *Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu.* Radio vision (Radar systems of remote sensing of the Earth). Moscow: Raditehnika, 2005. 368 p
5. *Bakulev P.A.* Radar systems. Moscow: Raditehnika, 2015. 440 p.
6. *Skolnik M.I.* Handbook of radar. Moscow: Technosfera, 2014. Vol. 2. 680 p.
7. *Moccia A., Chiacchio N., Capone A.* Space-borne bistatic synthetic aperture radar for remote sensing applications. Remote Sensing. 2000. Vol. 21, Iss. 18. Pp. 3395–3414.
8. *Honghui Yan, Yanfei Wang, Hui Yu, Bingchen Zhang.* Analysis of Geometry Resolution Characteristics of Formation flying Satellites Bistatic SAR. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences. 2004. Pp. 1–4.
9. *Krieger G., Fiedler H., Hounam D., Moreira A.* Analysis of system concepts for Bi- and Multi-Static SAR missions. IGARSS. 2003. Iss. 2. Pp. 770–772.
10. *Ziyue Tang, Shourong Zhang.* Principle of Bistatic SAR System. Science Publishing Company. 2003. Pp. 31–40.
11. *Homer J., Kubic K., Mojarrabi B., Lex A.* Passive bistatic radar sensing with LEOS based transmitters. IGARSS. 2002. Iss. 1. Pp. 438–440.
12. *Davies D. E. N.* Use of bistatic radar techniques to improve resolution in the vertical plane. Electronics Letters. 1968. Vol. 4. Pp. 170–171.
13. *Jackson M.C.* The geometry of bistatic radar systems. IEEE Proc. 1986. Dec. Vol. 133. Part F. No. 7. Pp. 604–612.