



УДК 621.396
ГРНТИ 47.49.02

СПОСОБ РАДИОЛОКАЦИИ ПО ВНЕШНИМ ИЗЛУЧЕНИЯМ

*М.П. БЕЛЯЕВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
В.А. УФАЕВ, доктор технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

На основе принципа двухсигнального пеленгования разработан способ радиолокации по внешним радиоизлучениям с управляемым нулём диаграммы направленности на цель и источник излучения. Приведен вариант реализации способа с математическим описанием основных операций пространственно-временной обработки. Выполнена сравнительная оценка эффективности.

Ключевые слова: радиолокация, радиомаяк, антенная решётка, диаграмма направленности, угловой спектр, нуль приёма.

RADIOLOCATION METHOD BY EXTERNAL RADIATIONS

*M.P. BELYAEV, Candidate of Technical Sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
V.A. UFAEV, Doctor of Technical Sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

On the basis of the principle of two-signal direction finding, a radiolocation method by external radio emission with a zero-directed beam pattern to the target and a radiation source has been developed. An embodiment of the method with a mathematical description of the space-time processing basic operations is presented. A comparative evaluation of effectiveness was carried out.

Keywords: radiolocation, radio beacon, antenna array, diagram directivity, angular spectrum, zero reception.

Введение. Одной из задач радиотехнического обеспечения полётов авиации является контроль воздушной обстановки в районе аэродрома. Для её решения используют радиолокационные станции [1] с мощностью передатчика в импульсе порядка 180 кВт.

Возможным вариантом является пассивная локация радиоизлучений непосредственно объекта, его бортовых передатчиков [2]. В этом случае необходимо не менее четырёх пунктов приёма с разветвленной системой связи для передачи принимаемых радиосигналов в центр обработки.

Известен способ разнесённой импульсной радиолокации [2]. Способ включает излучение зондирующего радиоимпульса, приём в удаленном пункте прямого сигнала с помощью ориентированной на передатчик антенны и отражённого от цели сигнала с помощью сканирующей антенны или системы антенн. Затем измеряют углы прихода отражённого от цели сигнала и временной интервал между моментами прихода прямого и отражённого сигналов. По результатам измерений рассчитывают дальность до цели с учетом известного взаимного положения пункта приёма и передатчика. Такому способу присущи следующие недостатки. В направлении передатчика и окружающего сектора образуется нерабочая зона, где прямой и отражённый сигналы не разрешаются по углам прихода, принимаются одновременно. В результате возникают недопустимые погрешности измерений пеленга цели и моментов запаздывания сигналов. Размеры зоны определяются шириной диаграммы направленности антенн и уровнем боковых ле-



пестков исходя из необходимости подавления прямого сигнала до заданного относительно отражённого сигнала уровня для обеспечения потребной точности измерений. С учётом существенно меньшей плотности мощности отражённого сигнала необходимые антенны трудно реализуемы, особенно в метровом диапазоне волн. Требование может быть ослаблено стробированием сигналов сканирующей антенны на временном интервале приёма зондирующего радиоимпульса. Однако такое неприменимо для непрерывных зондирующих радиоизлучений по причине их постоянного присутствия в эфире. Недостатком способа также является сложность проведения обзора системой узконаправленных антенн или большие временные затраты в случае применения одной сканирующей антенны.

Актуальность. Альтернативное решение состоит в локации объектов по внешним радиоизлучениям, например, маркерных радиомаяков из состава средств радиотехнического обеспечения полётов или радио-, телецентров с известным местоположением.

Цель статьи – разработка способа радиолокации по внешним радиоизлучениям.

Идея состоит в замене высоконаправленных сканирующих антенн кольцевой решеткой с формированием управляемого нулевого направления приёма на цель или передатчик. Открытость приёма при этом позволяет перейти от сканирования пространства к пространственно-временной обработке принятых сигналов, что упрощает процесс обзора.

Пространственно-временную обработку выполняют последовательно в два этапа. На первом этапе принятые сигналы преобразуют в угловой спектр с нулем приёма в направлении передатчика, по положению максимума спектра определяют направление на цель. Гарантированное формирование нуля приёма в направлении передатчика обеспечивает сужение нерабочего сектора до прямой линии независимо от вида сигнала. На втором этапе по принятым сигналам выполняют пространственную фильтрацию отражённого и прямого сигнала с нулём приема соответственно в направлении передатчика и цели. Данный этап может выполняться с приёмом на дополнительном временном интервале или по ранее принятым сигналам их задержкой на время выполнения первого этапа.

Таким образом, обсуждаемый способ разнесённой радиолокации включает излучение зондирующего радиосигнала передатчиком, приём сигналов в удаленном пункте, определение направления на цель, пространственную фильтрацию прямого и отражённого сигналов и определение по ним и направлению на цель дальности до неё. Приём сигналов осуществляют с помощью антенн, образующих антенную решётку. Принятые сигналы преобразуют в угловой спектр с нулём на передатчик. Направление на цель определяют по положению максимума этого спектра. После чего по принятым сигналам выполняют пространственную фильтрацию отражённого и прямого сигнала с нулём приема соответственно в направлении передатчика и цели.

Вариант реализации способа рассмотрим на примере системы разнесённой радиолокации рис.1.

Передатчик 1 является автономным техническим элементом системы. На приемном пункте 2 известно его и собственное местоположение, частота, ширина спектра излучения. Наряду с передатчиком, организационно входящим в систему, могут использоваться известные сторонние излучатели: радиомаяки, радио и телецентры. Антенны 3.1-3.N идентичные, всенаправленные в горизонтальной плоскости, типа вертикальный вибратор образуют кольцевую антенную решетку, параллельную земной поверхности, с эквидистантным расположением антенн на окружности заданного радиуса или объемную, дополненную антеннами на перпендикуляре из центра кольцевой решетки [3]. Приемники 4.1.-4.N цифрового типа обеспечивают квадратурный прием с представлением принимаемых сигналов отсчетами квадратурных составляющих [4].

Линии задержки 5.1, 5.2 предназначены для обеспечения запаздывания сигналов на время пространственного обзора и определения направления на цель в блоке определения максимума 7. В обеспечение работы анализатора углового спектра 6 и блоков фильтрации 8, 9 предварительно



определяют диаграммы направленности парциальных каналов антенной решётки как функции пеленгов двух объектов с нулём приема от второго из них по формуле [5]:

$$\dot{G}_n(\theta_1, \theta_2) = \frac{D_n(\theta_1) - D_n(\theta_2) \cdot \dot{\Pi}(\theta_1, \theta_2)}{\sqrt{1 - |\dot{\Pi}(\theta_1, \theta_2)|^2}}, \quad (1)$$

где $n = \overline{0, N - 1}$ – номер антенны и парциального канала при общем количестве N , θ_1, θ_2 – пеленг первого и второго объекта, $\dot{D}_n(\cdot)$ – комплексная диаграмма направленности n -й антенны, $\dot{\Pi}(\theta_1, \theta_2) = \sum_n \dot{D}_n(\theta_1) \cdot D_n^*(\theta_2) / N$ – функция неопределенности, * – операция комплексного сопряжения.

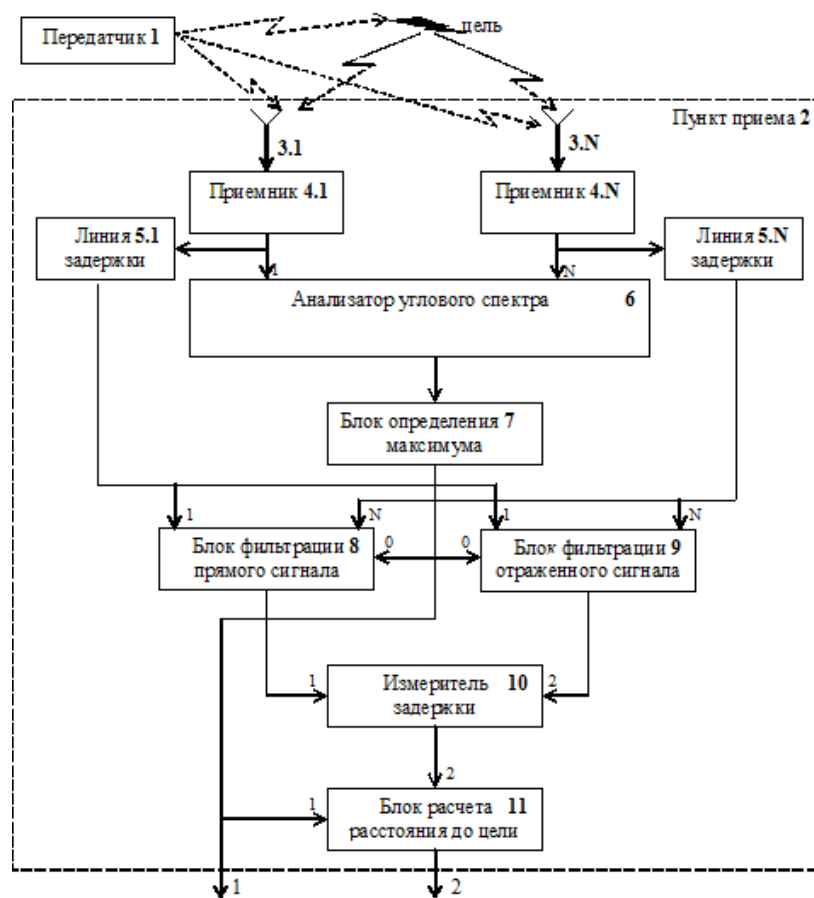


Рисунок 1 – Структурная схема разнесённой системы радиолокации

Формула (1) принципиальна. Обозначим пеленг передатчика θ_n , пеленг (истинный пеленг) цели θ_c , а возможное направление на цель в пределах всего окружающего пространства как θ , где $-\pi \leq \theta < \pi$. Тогда видно, что в направлении передатчика, когда $\theta = \theta_n$, формируется просечка, ноль диаграммы направленности $\dot{G}_n(\theta, \theta_n) = 0$. Эффект просечки виден на примере диаграмм направленности первых двух парциальных каналов антенной решетки рис.2.



Здесь и далее иллюстрации предлагаемого способа даны применительно к локации неподвижной наземной цели с применением кольцевой антенной решетки, когда комплексные диаграммы направленности антенн определяются по формуле:

$$\dot{D}_n(\theta) = \exp\left(i \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{\lambda} \cdot \cos \beta \cdot \cos\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot n\right)\right), \quad (2)$$

где i – мнимая единица, $\pi = 3,14\dots$, R – радиус антенной решетки, λ – длина волны излучения, $\beta = 0$ – угол прихода радиоволн в вертикальной плоскости.

Приняты следующие исходные данные: число антенн решетки $N = 9$, относительный радиус $R/\lambda = 1,5$, пеленг передатчика $\theta_{\text{п}} = 180^\circ$.

Последующая локация цели происходит следующим образом. Передатчик 1 излучает зондирующие радиосигналы. В пункте приема 2 принимают сигналы на частоте передатчика с помощью антенн 3.1-3.N и приемников 4.1-4.N. Принятые сигналы представляют собой смесь радиосигналов, прямого и отраженного от цели, с запаздыванием, пропорциональным расстоянию распространения, определяемому взаимным положением передатчика, пункта приема и цели. Пути распространения показаны на рис.1 пунктиром, тонкими пунктирными линиями для отраженного радиосигнала.

Принятые сигналы $\dot{S}_{n,t}$, где $t = \overline{0, T-1}$ – номер временного отсчета при общем количестве T , запоминают в линиях задержки 5.1-5.N, а в анализаторе 6 преобразуют в угловой спектр с максимумом на цель и нулем приема в направлении передатчика.

При этом диаграммы направленности парциальных каналов определяют как функцию $\dot{G}_n(\theta, \theta_{\text{п}})$ возможного пеленга цели и пеленга передатчика. Преобразование многократных временных отсчетов в угловой спектр осуществляют по следующей формуле:

$$\gamma(\theta) = \frac{1}{N^2} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n'=0}^{N-1} \left(\sum_t \dot{S}_{n,t} \cdot S_{n',t}^* \right) \cdot \left(\dot{G}_n^*(\theta, \theta_{\text{п}}) \cdot \dot{G}_{n'}(\theta, \theta_{\text{п}}) \right). \quad (3)$$

Это преобразование включает: квадратурное перемножение принятых сигналов $\dot{S}_{n,t} \cdot S_{n',t}^*$ в различных сочетаниях пар антенн $n = \overline{0, N-1}$, $n' = \overline{0, N-1}$, накопление в течение времени приема $\sum_t \dot{S}_{n,t} \cdot S_{n',t}^*$ и усреднение по совокупности пар с весами, равными квадратурным произведениям $\dot{G}_n^*(\theta, \theta_{\text{п}}) \cdot \dot{G}_{n'}(\theta, \theta_{\text{п}})$ соответствующих пар диаграмм направленности парциальных приемных каналов.

На рис.3 показан угловой спектр принятых сигналов, когда цель удалена от передатчика на угловое расстояние, равное 2 град (азимут цели $\theta_{\text{ц}}=178^\circ$), амплитуда отраженного от нее сигнала равна 10, относительно среднего квадратического значения шума приема, амплитуда прямого сигнала равна 200.

Наблюдается просечка углового спектра в направлении передатчика при одновременном максимуме в направлении цели. Последнее свойство является основой для определения направления на цель по максимуму углового спектра. Данная операция выполняется в блоке определения максимума 7, на выходе которого получают оценку пеленга цели $\hat{\theta}_{\text{ц}}$.

Определив направление на цель, выполняют пространственную фильтрацию сигнала, отраженного от цели, и прямого сигнала передатчика по принятым и задержанным на время по-



лучения пеленга цели сигналам, поступающим с линий задержки 5.1-5.N. Для фильтрации отраженного сигнала с нулем приема в направлении передатчика в блоке 9 сигналы когерентно суммируют с весами пропорциональными значениям диаграмм направленности парциальных каналов $\dot{G}_n(\hat{\theta}_ц, \theta_и)$ в направлении цели и передатчика.

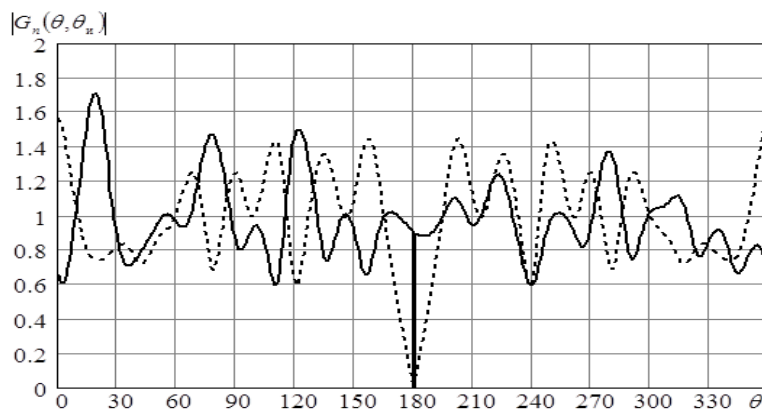


Рисунок 2 – Диаграммы направленности парциальных каналов

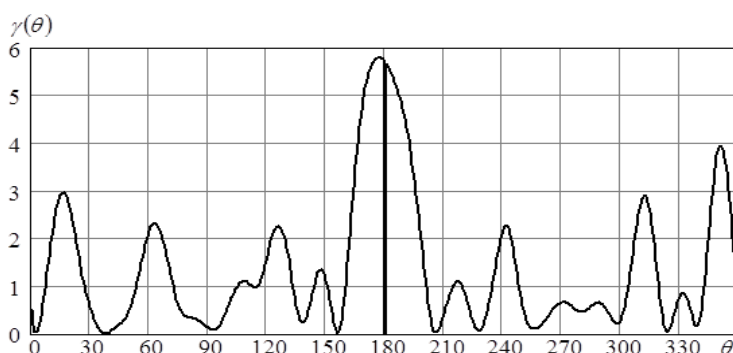


Рисунок 3 – Угловой спектр

Процесс фильтрации описывается формулой:

$$\dot{A}_{1,t} = K \cdot \sum_n \dot{S}_{n,t} \cdot \dot{G}_n^*(\hat{\theta}_ц, \theta_и). \tag{4}$$

Масштабный коэффициент, равный $K = 1 / N \sqrt{1 - |\dot{\Gamma}(\hat{\theta}_ц, \theta_и)|^2}$ введен для приведения результатов фильтрации к центру антенной решетки.

Аналогично в блоке 8 выполняют пространственную фильтрацию прямого сигнала передатчика, но с нулем приема в направлении цели:

$$\dot{A}_{2,t} = K \cdot \sum_n \dot{S}_{n,t} \cdot \dot{G}_n(\theta_и, \hat{\theta}_ц). \tag{5}$$

В соответствии с соотношениями (4), (5) фильтрацию выполняют одностипно, переменной мест аргументов в диаграммах направленности парциальных приемных каналов.



Проведение пространственной фильтрации возможно также без применения линий задержки 5.1-5.N, путем приема сигналов на дополнительном временном интервале после определения в блоке 7 пеленга цели.

Заключительные действия выполняют, как и в способе разнесённой импульсной радиолокации [2]: измеряют задержку между отфильтрованными сигналами в измерителе 10, а в блоке 11 по полученному пеленгу и измеренной задержке рассчитывают расстояние до цели.

При локации воздушной подвижной цели измерение задержки выполняют с учетом доплеровского сдвига частот, а операции, описываемые соотношениями (4)-(5), как двухмерные по углам прихода радиоволн в горизонтальной и вертикальной плоскости.

Выводы. Эффективность предлагаемого способа выражается в расширении рабочей зоны. Количественную оценку выполним следующим образом. Когда антенная решетка применяется для обзора пространства согласно способу [2] с формированием максимума диаграммы направленности решетки в направлении возможного положения цели, ширина основного лепестка ее диаграммы направленности равна [6] $\Delta\theta = 4 \cdot \sin(1,23 \cdot \lambda / (2 \cdot \pi \cdot R))$ и для рассматриваемого примера составляет 30° . По крайней мере, на эту величину увеличивается рабочая зона системы предлагаемым способом. С учетом уровня боковых лепестков такой антенной решетки -8 дБ рабочая зона расширяется дополнительно в 3-5 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машков В.Г. Техническая эксплуатация радиотехнических средств полёта авиации: учебник. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА им. Проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2014. 358 с.
2. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Сов. Радио, 1970. 420 с.
3. Уфаев А.В., Уфаев В.А. Синтез и исследование алгоритмов пеленгования с применением объемной антенной решетки. Антенны. 2013. №5 (192). С. 53–58.
4. Побережский Е.С. Цифровые радиоприемные устройства. М.: Радио и связь, 1987.
5. Уфаев В.А. Потенциальные точности двухсигнального пеленгования. Антенны. 2011. №5(168). С. 44–53.
6. Саидов А.С., Тагилаев А.Р., Алиев Н.М., Асланов Г.К. Проектирование фазовых автоматических радиопеленгаторов. М.: Радио и связь. 1997. 280 с.

REFERENCES

1. Mashkov V.G. Tekhnicheskaya ehkspluatatsiya radiotekhnicheskikh sredstv polyota aviatsii: uchebnik. Voronezh: VUNTS VVS «VVA im. Prof. N.E. Zhukovskogo i YU.A. Gagarina». 2014. 358 p. (in Russian).
2. Teoreticheskie osnovy radiolokatsii / Pod red. YA. D. SHirmana. M.: Sov. Radio, 1970. 420 p. (in Russian).
3. Ufaev A.V., Ufaev V.A. Sintez i issledovanie algoritmov pelengovaniya s primeneniem ob'emnoy antennoy reshetki. Antenny. 2013. №5 (192). P. 53–58. (in Russian).
4. Poberezhskiy E.S. TSifrovyye radiopriemnyye ustroystva. M.: Radio i svyaz'. 1987. (in Russian).
5. Ufaev V.A. Potentsial'nye tochnosti dvuhsignal'nogo pelengovaniya. Antenny. 2011. №5(168). P. 44–53. (in Russian).
6. Saidov A.S., Tagilaev A.R., Aliev N.M., Aslanov G.K. Proektirovanie fazovykh avtomaticheskikh radiopelengatorov. M.: Radio i svyaz'. 1997. 280 p. (in Russian).



© Беляев М.П., Уфаев В.А., 2018

Беляев Максим Павлович, кандидат технических наук, заместитель начальника 23 отдела научно-исследовательского 2 управления научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, belyaev_mp@mail.ru.

Уфаев Владимир Анатольевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник 23 отдела научно-исследовательского 2 управления научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, andreyuff@mail.ru.