

РАДИОЛОКАТОР С ИМПУЛЬСНЫМ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫМ ЗОНДИРУЮЩИМ СИГНАЛОМ

Предлагается техническое решение по построению РЛС микроволнового диапазона с импульсным фазоманипулированным зондирующим сигналом и вынесенным приемным пунктом.

Работа РЛС основана на фазовом методе пеленгования цели по азимуту с РЛС и приемного пункта. РЛС предназначена для определения географических координат и высоты полета воздушной цели. Возможность оценки высоты полета цели основана на очень точном измерении дальности путем использования фазоманипулированного сигнала, несущего информацию о времени его излучения.

Достоинством предложения является то, что в нем для точного пеленгования по азимуту не требуется использовать антенн больших размеров, устранено влияние земли на результаты пеленгования, а также то, что непосредственное пеленгование по углу места не производится.

Ключевые слова: радиолокационные радиотехнической системы, метод пеленгования цели, определения географических координат и высоты полета воздушной цели.

Постановка задачи и анализ известных публикаций. Традиционные импульсные радиолокаторы (РЛС) [1] измеряют дальность цели по времени запаздывания импульса эхо-сигнала цели относительно зондирующего импульса. При этом погрешность измерения дальности имеет порядок произведения скорости света на половину длительности зондирующего импульса. В ряде практических случаев такая погрешность недопустимо велика и требуется ее уменьшить. Методы измерения координат цели в типовых РЛС подробно описаны в литературе [1-4].

Применяемые в типовых РЛС амплитудные методы пеленгования цели по угловым координатам [2] осуществляют пеленгование по максимуму сигнала при сканировании антенны. При этом погрешность пеленгования имеет порядок половины ширины диаграммы направленности (ДН) антенны. Для снижения этой погрешности требуется использовать антенну больших размеров, что не всегда целесообразно.

Известные фазовые измерители угловых координат [1] измеряют их по сдвигу фаз сигналов в разнесенных антеннах. Недостатком таких измерителей является то, что они не могут измерять средние и малые углы места из-за неоднозначности измерения сдвига фаз сигналов, которая вызвана влиянием земли [5]. Искажения фазы сигнала в двух разнесенных по высоте антеннах из-за влияния радиоволн, отраженных от земли, различны и это вызывает дополнительные погрешности измерения сдвига фаз сигналов в этих антеннах и приводит к неоднозначности измерения угла места по сдвигу фаз.

В связи с этим в настоящее время имеется необходимость совершенствовать РЛС и обеспечить возможность измерения географических координат и высоты полета цели. Это требуется, например, для сопровождения воздушной цели по трем координатам.

Решить эту задачу предлагается на основе совместного использования РЛС с импульсным фазоманипулированным зондирующим сигналом и одного вынесенного наземного приемного пункта. При этом пеленгование цели по азимуту производится фазовым методом с РЛС и с вынесенного приемного пункта, пеленгование по углу места вообще не производится, а высоту цели определяют косвенно по результатам двух азимутальных пеленгов и точного измерения дальности цели с РЛС.

Цель статьи. Целью статьи является разработка технического решения по построению РЛС микроволнового диапазона с импульсным фазоманипулированным зондирующим сигналом и одного наземного вынесенного приемного пункта для обеспечения возможности определения географических координат и высоты полета цели по результатам азимутального пеленгования с РЛС и приемного пункта и точного измерения дальности цели с РЛС.

Предполагается, что зондирующий сигнал РЛС представляет периодическую последовательность радиоимпульсов сравнительно большой длительности. Импульсы чередуются: сначала излучается гладкий радиоимпульс на несущей частоте РЛС, а за ним - фазоманипулированный импульс, который несет закодированную информацию о точном времени его излучения по часам РЛС. Гладкий радиоимпульс используют в системе азимутального пеленгования цели фазовым методом на РЛС и вынесенном приемном пункте. Фазоманипулированный импульс используют в системе измерения дальности. Фазоманипулированный импульс эхо-сигнала цели принимают на РЛС, расшифровывают значение времени его излучения, вычитают это время из текущего времени по часам РЛС и таким образом определяют время запаздывания и дальность цели. Современное развитие цифровой техники позволяет надеяться на то, что предложенный метод измерения дальности будет точнее, чем традиционный аналоговый метод измерения дальности по времени запаздывания импульсов. При этом полагают, что время задержки сигнала в приемнике и расшифровывания информации известно и это время следует вычесть из времени запаздывания.

Длительность гладкого радиоимпульса РЛС выбирается так, чтобы за время его длительности можно было измерить сдвиг фаз сигналов в разнесенных антеннах. Эта длительность будет значительно больше, чем длительность импульса типовых РЛС.

Принцип азимутального фазового пеленгования цели с РЛС поясняется рис. 1, где показан упрощенный эскиз антенной системы РЛС в двух проекциях.

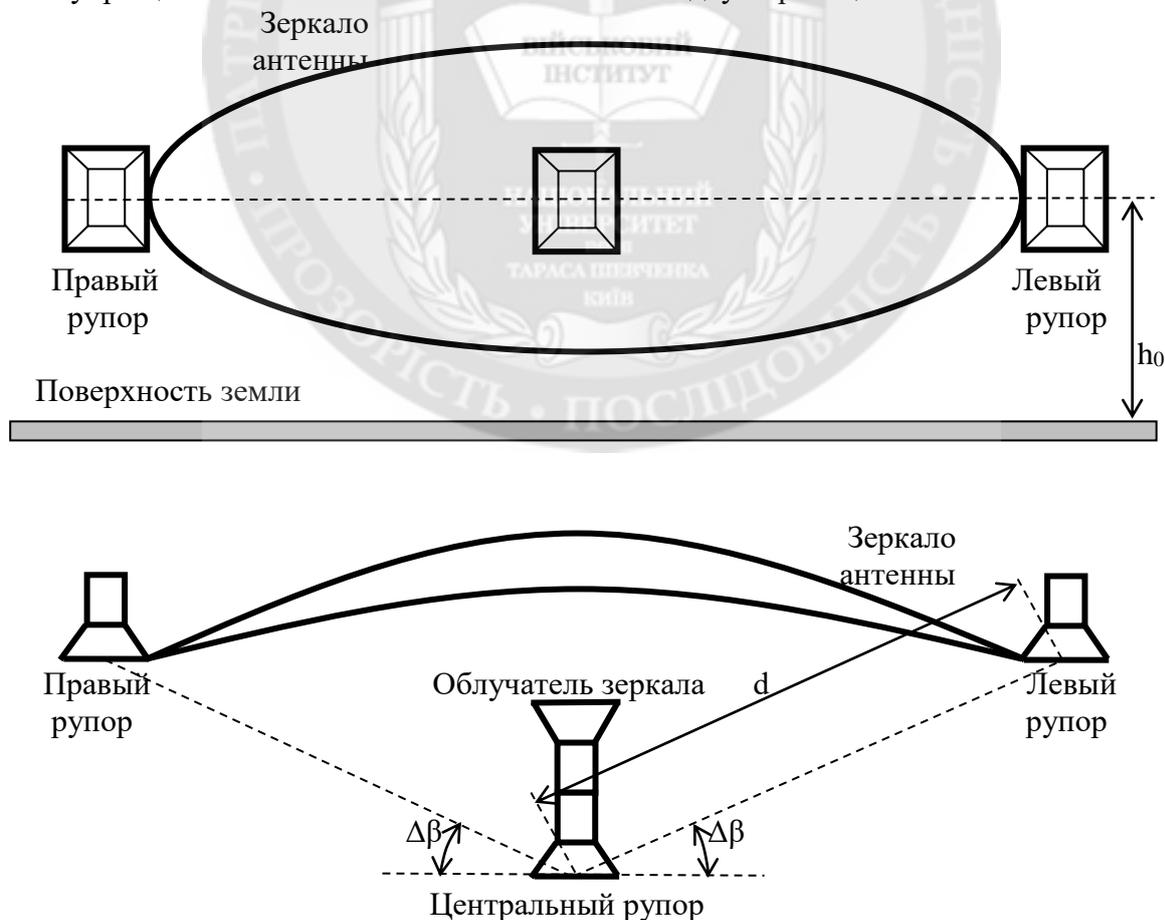


Рис. 1. Антенная система РЛС

Основная приемо-передающая антенна РЛС представляет собой обычную зеркальную антенну со своим облучателем. Эта антенна используется для облучения цели и измерения дальности цели описанным выше методом.

Антенная система измерения азимута состоит из трех одинаковых элементов (например, небольших пирамидальных рупоров). Центральный рупор расположен позади облучателя зеркала, а правый и левый рупоры подвешены по краям зеркала. Все рупоры находятся на одинаковой высоте над землей h_0 . Это принципиально важно для ослабления влияния земли на результаты измерений. Все рупоры работают только на прием, а для пеленгования цели по азимуту используется фазовый метод [2].

Во время приема гладкого радиоимпульса эхо-сигнала цели измеряют сдвиги фаз $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$ сигнала центрального рупора относительно сигналов левого и правого рупоров. Эти сдвиги фаз определяются следующими формулами

$$\varphi_1 = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta \sin(\beta - \Delta\beta), \quad (1)$$

$$\varphi_2 = -\frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta \sin(\beta + \Delta\beta), \quad (2)$$

где d – расстояние от центрального рупора до правого (или левого) рупора;

β – азимутальный угол цели относительно оси антенны;

θ – угол места цели с РЛС;

λ – длина волны;

$\Delta\beta$ – угол отклонения направления от центрального рупора до правого (или левого) рупора относительно поперечной горизонтали антенны.

Сложность использования формул (1), (2) для определения азимутального угла цели состоит в том, что реальные фазометры измеряют сдвиг фаз с неопределенностью $\pm 2\pi n$ (n – целое число). Поэтому измеренные значения сдвигов фаз будут отличаться на указанную неопределенность от действительных. Это затрудняет непосредственное использование формул (1), (2). Условно полагается, что фазометр РЛС измеряет сдвиг фаз в интервале от нуля до 2π . Для исключения указанной неопределенности азимутальный угол цели β предлагается определять путем решения следующего трансцендентного уравнения

$$\frac{\Delta\varphi_{1i} + 2\pi \text{sign} \sin(\beta - \Delta\beta) \text{entier} \left| \frac{d}{\lambda} \sin(\beta - \Delta\beta) - \pi(1 - \text{sign} \sin(\beta - \Delta\beta)) \right|}{\Delta\varphi_{2i} - 2\pi \text{sign} \sin(\beta + \Delta\beta) \text{entier} \left| \frac{d}{\lambda} \sin(\beta - \Delta\beta) - \pi(1 + \text{sign} \sin(\beta + \Delta\beta)) \right|} + \frac{\sin(\beta - \Delta\beta)}{\sin(\beta + \Delta\beta)} = 0, \quad (3)$$

где $\Delta\varphi_{1i}$, $\Delta\varphi_{2i}$, – сдвиги фаз сигнала центрального рупора относительно сигналов левого и правого рупоров, измеренные фазометром РЛС;

sign – знак числа;

entier – целая часть числа, а другие обозначения были пояснены выше.

Формула (3) получены путем нахождения отношений формул (1), (2) с учетом указанной неопределенности.

С увеличением разноса рупоров вдоль и поперек антенны (см. рис.1) точность пеленгования возрастает.

В широком азимутальном секторе трансцендентное уравнение (3) имеет множество корней. Правильный корень можно найти, если правильно задать интервал его поиска при решении численным методом уравнения (3). Этот интервал можно задать в пределах ширины ДН зеркальной антенны по азимуту.

Следует отметить, что после определения азимутального угла β из формулы (3) можно также грубо оценить угол места цели с РЛС θ из формулы (1). Для этого предлагается использовать следующее соотношение

$$\theta = \arccos \frac{\lambda \left[\Delta\varphi_{1i} + 2\pi \text{sign} \sin(\beta - \Delta\beta) \text{entier} \left| \frac{d}{\lambda} \sin(\beta - \Delta\beta) \right| - \pi(1 - \text{sign} \sin(\beta - \Delta\beta)) \right]}{2\pi d \sin(\beta - \Delta\beta)} \quad (4)$$

Расчетные точностные характеристики предложенного метода пеленгования представлены на рис. 2, 3, где показаны зависимости погрешности пеленгования по азимуту и углу места от погрешности измерения сдвига фаз сигналов фазометром РЛС.

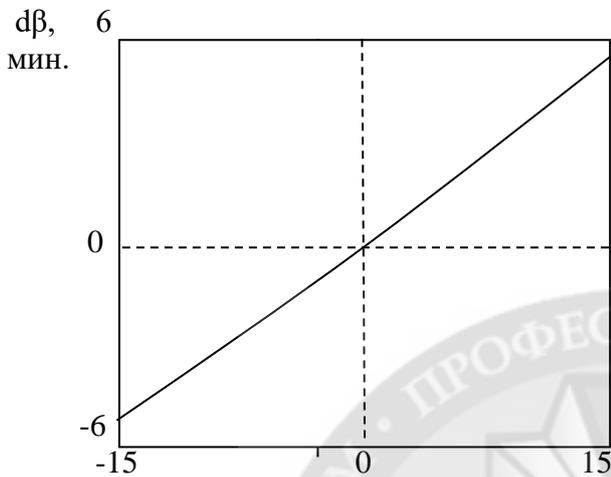


Рис. 2. Погрешность азимута

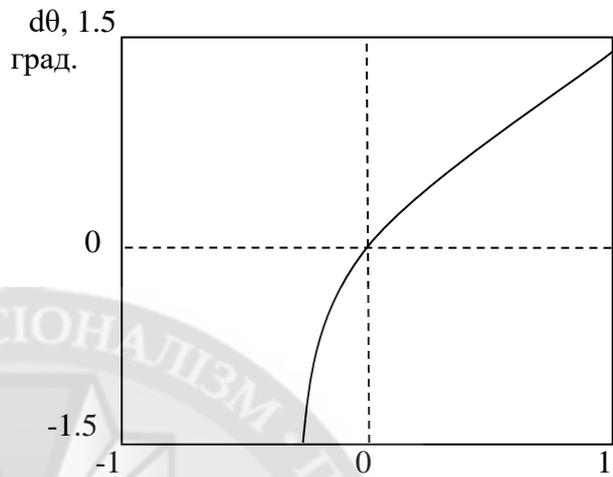


Рис. 3. Погрешность угла места

Оценки показывают, что предложенная система пеленгования по азимуту может обеспечить вполне приемлемые результаты. Однако погрешность оценки угла места цели в предложенном методе недопустимо велика даже при незначительных погрешностях фазометра. Поэтому фазовый метод не может быть рекомендован для определения малых углов места цели и от пеленгования по углу места придется отказаться.

На вынесенном приемном пункте пеленгование цели по азимуту производится фазовым методом так же, как и на РЛС. Однако антенная система приемного пункта имеет несколько иную конструкцию. Принцип работы приемного пункта поясняется рис. 4, где представлен упрощенный эскиз его антенной системы в двух проекциях.

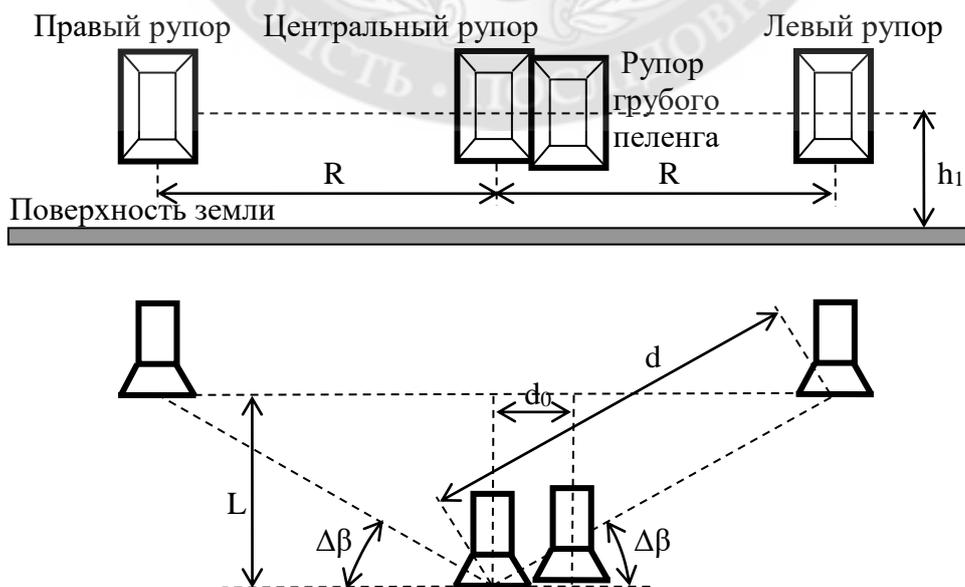


Рис. 4. Антенная система приемного пункта

Антенная система приемного пункта состоит из четырех одинаковых элементов (например, небольших пирамидальных рупоров). Все рупоры находятся на одинаковой высоте над землей h_1 . Это принципиально важно для ослабления влияния земли на результаты измерений. Все рупоры работают только на прием, а для пеленгования цели по азимуту используется фазовый метод [2].

Центральный рупор и расположенный рядом с ним рупор грубого пеленга используются в системе грубого пеленгования цели по азимуту. Измеряют сдвиг фаз $\Delta\varphi$ сигнала центрального рупора относительно сигнала рупора грубого пеленга и приближенно определяют азимутальный угол цели относительно оси антенны β по следующей известной формуле [2]

$$\beta = \arcsin \frac{\lambda \Delta\varphi}{2\pi d_0}, \quad (5)$$

где d_0 – расстояние между центральным рупором и рупором грубого пеленга;

λ – длина волны.

Для обеспечения однозначности фазового метода пеленгования требуется, чтобы расстояние d_0 не превышало длины волны. Формула (5) дает очень грубый результат, так как не учитывает влияние на сдвиг фаз угла места цели и весьма чувствительна к погрешностям измерения сдвига фаз. Поэтому полученное значение азимутального угла β требуется уточнить. Это делается с помощью системы точного пеленгования, которая состоит из центрального, правого и левого рупоров. Измеряют сдвиги фаз $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$ сигнала центрального рупора относительно сигналов левого и правого рупоров и используют их для уточнения азимута цели. Это делается так же, как и на РЛС путем решения трансцендентного уравнения (3).

В широком азимутальном секторе трансцендентное уравнение (3) имеет множество корней. Правильный корень можно найти, если правильно задать интервал его поиска при решении численным методом уравнения (3). Этот интервал можно задать вблизи результата грубого определения пеленга в системе грубого пеленгования. То есть грубое пеленгование требуется для реализации алгоритма точного пеленгования.

По азимутам цели β_1 , β_2 с РЛС и вынесенного приемного пункта можно определить географические координаты цели. Геоцентрическую широту цели φ_c предлагается определять путем решения следующего трансцендентного уравнения

$$tg\{(\lambda_1 - \lambda_0)\cos\varphi_c + arctg[tg\beta_1 \sin(\varphi_c - \varphi_1)]\} - tg\beta_0 \sin(\varphi_c - \varphi_0) = 0, \quad (6)$$

где (λ_0, φ_0) – долгота и широта РЛС;

(λ_1, φ_1) – долгота и широта вынесенного приемного пункта.

После этого можно определить географическую долготу цели λ_c по формуле

$$\lambda_c = \lambda_1 + \frac{arctg[tg\beta_1 \sin(\varphi_c - \varphi_1)]}{\cos\varphi_c}. \quad (7)$$

Следует отметить, что с увеличением разноса между РЛС и приемным пунктом точность определения координат цели будет выше.

После определения географических координат цели (λ_c, φ_c) можно определить высоту полета цели h_c над уровнем моря. Для этого используется результат измерения дальности цели r с РЛС и следующая формула

$$h_c = \frac{r \sin \left[\gamma + \arcsin \frac{(R_z + h_0) \sin \gamma}{r} \right]}{\sin \gamma} - R_z, \quad (8)$$

где h_0 – высота подъема антенны РЛС над уровнем моря;

R_z – радиус Земли в районе цели;

γ – геоцентрический угол между РЛС и целью, равный

$$\gamma = \arccos[\cos\varphi_c \cos\varphi_0 \cos(\lambda_c - \lambda_0) + \sin\varphi_c \sin\varphi_0]. \quad (9)$$

Формулы (6-9) получены на основе сферической геометрии взаимного расположения РЛС, приемного пункта и воздушной цели. Формулы (1-9) представляют алгоритм работы предложенной РЛС.

Пример расчета погрешности определения высоты цели предложенным методом в зависимости от погрешности измерения дальности представлен на рис.5.

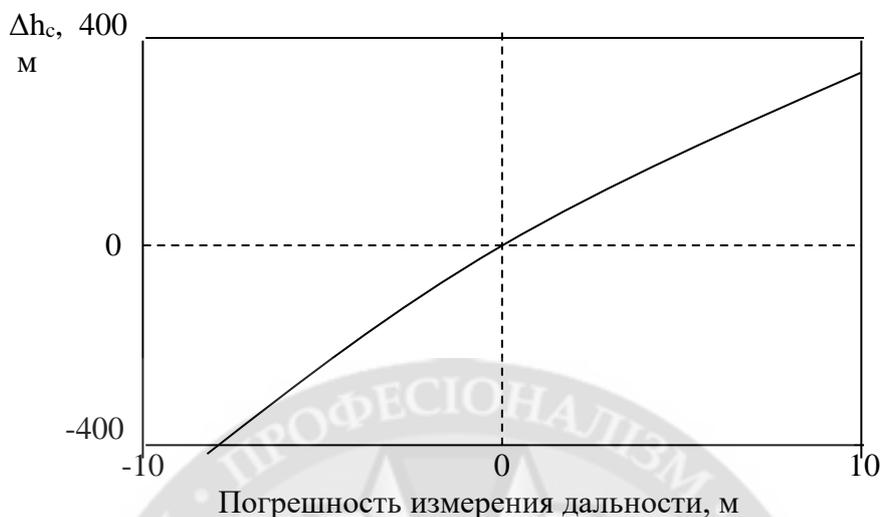


Рис. 5. Погрешность определения высоты цели

Расчет проведен для следующих значений исходных данных: длина волны 0.15 м; высота полета цели 2000 м; дальность от РЛС до цели 125.630 км; дальность от РЛС до вынесенного приемного пункта 55.548 км.

Расчеты показали, что предложенная РЛС может обеспечить высокую точность определения географических координат воздушной цели. Однако для достоверного определения высоты полета цели потребуется обеспечить очень высокую точность измерения дальности предложенным методом, что пока проблематично.

Выводы. Разработаны предложения по построению РЛС с импульсным фазоманипулированным зондирующим сигналом и вынесенным приемным пунктом. Работа РЛС основана на фазовом методе пеленгования цели по азимуту с РЛС и приемного пункта. Предложение позволяет определять географические координаты и высоту полета цели. Возможность оценки высоты полета цели основана на очень точном измерении дальности путем использования фазоманипулированного сигнала, несущего информацию о времени его излучения. Предложен алгоритм работы РЛС и оценены ее точностные характеристики. Достоинством предложенной РЛС является то, что в ней для точного пеленгования по азимуту не требуется использовать антенны больших размеров, устранено влияние земли на результаты пеленгования, а также то, что непосредственное пеленгование по углу места не производится вообще, то есть устранена наиболее сложная операция пеленгационных систем.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Радиолокационные устройства (теория и принципы построения) / [В. В. Васин, О. В. Власов, В. В. Григорин-Рябов и др.] ; под ред. В. В. Григорина-Рябова. – М. : Сов. радио, 1970. – 680 с.
2. Справочник по основам радиолокационной техники / [А. М. Педак, П. И. Баклашов, Л. А. Барвинский и др.] ; под ред. В. В. Дружинина. – М. : Воениздат, 1967. – 768 с.
3. Радиотехнические системы / [Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др.] ; под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : Высшая школа, 1990. – 496 с.
4. Справочник по радиолокации : в 4 т. / [под ред. Сколника М. ; под общ. ред. Трофимова К.]. – М. : Сов. радио, 1978. –Том 4. : Радиолокационные станции и системы / [под ред. Вейсбейна М.]. – 1978. – 376 с.

5. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Черный Ф. Б. – [2-е изд., доп. и перераб.]. – М. : Сов. радио, 1972. – 464 с.

6. Основы радиотехнических систем : учебное пособие [Электронный ресурс] / Зырянов Ю. Т., Белоусов О. А., Федюнин П. А. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2011. – 144 с. – Режим доступа : <http://window.edu.ru/resource/474/76474/files/zyryanov.pdf>.

7. Никольский Б. А. Основы радиотехнических систем [Электронный ресурс] : [электрон. учебник] / Б. А. Никольский. – Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2013. – 469 с. – Режим доступа :

http://www.ssau.ru/files/education/uch_posob/Osnovy%20радиотехнических%20систем-Никольский%20БА.pdf.

REFERENCES:

1. Vasin V. V., Vlasov O. V., Grigorin-Rjabov V. V. (1970) Radiolokacionnye ustrojstva (teorija i principy postroenija) [Radar devices (theory and principles of structure)]. Moscow, Sov. radio, Publ., 680 p. (In Russian).

2. Pedak A. M., Baklashov P. I., Barvinskij L. A., (1967) Spravochnik po osnovam radiolokacionnoj tehniki, [Handbook on basics of radar equipment]. Moscow, Voenizdat, Publ., 768 p. (In Russian).

3. Grishin Ju. P., Ipatov V. P., Kazarinov Ju. M., (1990) Radiotekhnicheskie sistemy, [Radar systems.] Moscow, Vysshaja shkola Publ., 496 p. (In Russian).

4. Skolnik M., Trofimov K., (1978) Spravochnik po radiolokacii : v 4 t. [Handbook on radiolocation.]. Moscow, : Sov. radio, Publ., Т. 4. 376 p. (In Russian).

5. Chernyj F. B. (1972) Rasprostranenie radiovoln, [Radiowave propagation]. Moscow, : Sov. radio, Publ. 464 p. (In Russian).

6. Zyrjanov Ju. T., Belousov O. A., Fedjunin P. A. (2011) Osnovy radiotekhnicheskikh sistem uchebnoe posobie [The basics of radio systems]. Available at: <http://window.edu.ru/resource/474/76474/files/zyryanov.pdf>.

7. Nikol'skij B. A. (2013) Osnovy radiotekhnicheskikh sistem: [The foundations of radio systems] Available at: http://www.ssau.ru/files/education/uch_posob/Osnovy%20radiotekhnicheskikh%20sistem-Nikol'skij%20BA.pdf.

Рецензент: д.т.н., проф. Жердев М.К., Військовий інститут телекомунікації та інформатизації НТУУ «КПІ», Київ

к.т.н., доц. Бахвалов В.Б., к.т.н. Хірх-Ялан В.І., Савчинська Н.Ю.
РАДИОЛОКАТОР ІЗ ІМПУЛЬСНИМ ФАЗОМАНІПУЛЬОВАНИМ
ЗОНДУЮЧИМ СИГНАЛОМ

Пропонується технічне рішення з побудови РЛС мікрохвильового діапазону з імпульсним фазоманіпульованим зондуючим сигналом і винесеним приймальним пунктом.

Робота РЛС заснована на фазовому методі пеленгації цілі по азимуту з РЛС і приймального пункту. РЛС призначена для визначення географічних координат і висоти польоту повітряної цілі. Можливість оцінки висоти польоту цілі заснована на дуже точному вимірі дальності шляхом використання фазоманіпульованого сигналу, що несе інформацію про час його випромінювання.

Перевагою пропозиції є те, що для точного пеленгування по азимуту не потрібно використовувати антен великих розмірів, усунуто вплив землі на результати пеленгування, а також те, що безпосереднє пеленгація по куту місця не проводиться.

Ключові слова: радіолокаційні радіотехнічної системи, метод пеленгування цілі, визначення географічних координат і висоти польоту повітряної цілі.

Ph.D. Bakhvalov V.B., Ph.D. Khirikh-Ialan V.I., Savchinskaya N.Yu.
RADAR STATION WITH THE IMPULSE PHASE-SHIFT KEYED SOUNDING SIGNAL

The article provides a technical solution to building radar station microwave band with the impulse phase-shift keyed sounding signal and remote reception center.

Functioning of the radar station is built on the phase method of target finding by azimuth from radar station or reception center. Radar station is designed to determine geographic coordinates and

flying height of an air target. The possibility to assess the flying height is based of extremely accurate measurement of the distance using phase-shift keyed sounding signal, containing information on the time of its emission.

The advantage of such option is the fact that it does not provide for using large antenna systems for accurate determination by azimuth, the ground effect does not impact the results of direction finding and direct direction finding in elevation is not conducted.

Keywords: radar radio-technical systems, target finding approach, determination of geographic coordinates and flying height of an air target.

