

PHASE DIRECTION FINDER ACCURACY ASSESSMENT USING AN IMPULSE RADIO SIGNAL GROUND REFLECTION MODEL

V.Y. Kuprits^{*}, A.A. Meshcheryakov
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
Russia, 634050, Tomsk, Ave. Lenina, 40
**e-mail: vladimir.i.kuprits@tusur.ru*

The results of the accuracy assessment of phase direction finders with horn antennas and antenna arrays made of Vivaldi elements are presented using a mathematical model of pulsed radio signal reflections from the underlying earth's surface. It is shown that the use of the proposed multi-point model of reflections from the earth's surface allows one to analyze and estimate the errors in the direction finding of radio emission sources by a phase direction finder on ground propagation paths of radio waves of various lengths.

Keywords: multipoint mathematical model, radio signal distortion, experimental research, Vivaldi antenna, horn antenna

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ФАЗОВЫХ ПЕЛЕНГАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ОТРАЖЕНИЙ ИМПУЛЬСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ ОТ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.Ю. Куприц^{*}, А.А. Мещеряков
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40
**e-mail: vladimir.i.kuprits@tusur.ru*

Приведены результаты сравнения оценок точности фазовых пеленгаторов с рупорными антеннами и антенными решетками из элементов Вивальди, полученных путем моделирования с использованием многоточечной математической модели отражений импульсных радиосигналов от подстилающей земной поверхности с результатами экспериментальных исследований. Показано, что использование предложенной модели позволяет с приемлемой (допустимой) точностью проводить оценки ошибок пеленгования источников радиоизлучения фазовым пеленгатором на приземных трассах распространения радиоволн различной протяженности.

Ключевые слова: многоточечная математическая модель, искажения радиосигналов, экспериментальные исследования, антенна Вивальди, рупорная антенна

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проектировании аппаратуры радиолокационных систем и синтезе эффективных алгоритмов обработки радиолокационных сигналов возникает необходимость в проверке работоспособности аппаратуры на математических моделях наблюдаемой радиолокационной обстановки [1]. На практике широко используются различные приближенные математические модели, позволяющие учесть основные факторы, влияющие на искажения сигналов при их распространении над земной поверхностью, такие как многолучевость распространения и ослабление [2]. Одна из таких математических моделей с результатами её практической применимости для оценки точности амплитудных пеленгаторов приведена в статье [3]. В модели реальные неоднородности и объекты на поверхности (такие как деревья, здания, рельеф) аппроксимируются совокупностью отражающих точек, каждая из которых характеризуется заданными отражающими свойствами.

При создании фазовых пеленгаторов стоит задача выбора антенной системы, параметры которой существенно влияют на ошибки определения фаз принятых сигналов. В частности, источниками ошибок определяющие выбор типа антенной системы в однобазовом фазовом пеленгаторе являются:

- не идентичность амплитудно-частотных характеристик антенн;
- асимметрия диаграмм направленности.

В настоящей работе рассматриваются два типа антенной системы рупорные антенны и антенные решетки, состоящие из антенн Вивальди. Достоинством рупорных антенн является узкая диаграмма направленности, слабая взаимная связь, высокий коэффициент направленного действия, низкий уровень боковых лепестков. Недостатками являются ограниченная полоса рабочих частот, большие габариты рупоров, сложности идеальной калибровки амплитудно-фазовой характеристики рупоров. Антенные решетки из элементов Вивальди обладают очень широкой полосой рабочих частот, компактной плоской хорошо интегрируемой конструкцией, возможностью формирования цифровой решётки и точной калибровки. Но имеют ограничения: сильное взаимное влияние элементов решётки, широкополосная структура приводит к различиям фазовых центров элементов в зависимости от частоты, боковые лепестки выше, чем у рупоров.

Целью данной работы является сравнение оценок точности фазовых пеленгаторов с рупорными антеннами и антенными решетками из элементов Вивальди, полученных при моделировании с использованием многоточечной математической модели отражений импульсных радиосигналов от подстилающей земной поверхности [3] с результатами

экспериментальных исследований на приземных трассах распространения радиоволн различной протяженности.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ОТРАЖЕНИЙ ИМПУЛЬСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ ОТ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Важную роль при оценке точности работы фазового однобазового пеленгатора играет выбор той или иной модели отражений импульсных радиосигналов от земной поверхности. Влияние отражений на фазовую структуру принимаемого сигнала может вызывать фазовые искажения, ведущие к ошибкам в определении направления на источник излучения. При наличии отражений от земной поверхности (или других объектов на трассе распространения) к прямому сигналу, пришедшему по кратчайшему расстоянию, добавляется отражённый, вызывая мультипликативные интерференционные искажения.

При этом ошибка измерения фазы может быть определена как [4]

$$\Delta\varphi = \arg\left(1 + K \cdot e^{j(\Delta\omega\Delta\tau + \varphi_{omp})}\right), \quad (1)$$

где K - комплексный коэффициент отражения, учитывающий потери и фазовый сдвиг, $\Delta\omega$ - ширина спектра сигнала, $\Delta\tau$ - разность времени прохождения прямого и отражённого лучей, то есть задержка отражённого сигнала относительно прямого, φ_{omp} - фазовый сдвиг при отражении.

Направление на источник излучения α фазовым пеленгатором определяется по разности фаз сигналов $\Delta\phi$, принятых на разнесенные на расстояние d антенны пеленгатора [4]

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi d} \cdot \Delta\phi\right), \quad (2)$$

где d - база фазового пеленгатора, λ - длина волны.

При наличии в принимаемом сигнале отраженных сигналов от элементов рельефа местности измеряемая разность фаз искажается

$$\Delta\phi' = \Delta\phi + \Delta\varphi, \quad (3)$$

приводя к ошибке пеленга на величину равную [5]

$$\Delta\alpha = \frac{\lambda}{2\pi d \cos(\alpha)} \Delta\varphi. \quad (4)$$

Среднеквадратическая ошибка пеленга (СКО) фазового однобазового пеленгатора связана с СКО разности фаз и в общем виде выражается как [4]

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\lambda}{2\pi d \cos(\alpha)} \sigma_{\phi}, \quad (5)$$

где σ_{α} — СКО пеленга (в радианах), σ_{ϕ} — СКО разности фаз (в радианах).

В общем случае для многоточечной модели сигнал, принимаемый на одну приемную антенну пеленгатора, можно представить в виде суммы комплексной амплитуды прямого сигнала \dot{E}_p и суммы комплексных амплитуд сигналов \dot{E}_{ci} , переотраженных от подстилающей поверхности [3]:

$$\dot{E}(\alpha) = \dot{E}_p(\alpha) + \sum_{i=1}^N \dot{E}_{ci}(\alpha), \quad (6)$$

где N - число отражателей, $\dot{E}_p(\alpha) = A_p(\alpha)e^{j\varphi_0}$, $\dot{E}_{ci}(\alpha) = A_{ci}(\alpha)e^{j(\varphi_0+\varphi_i(\alpha))}$, A_p и φ_0 - амплитуда и начальная фаза прямого сигнала, A_{ci} и $\varphi_i(\alpha)$ - случайные амплитуда и фаза сигнала, переотраженного i -м отражателем подстилающей поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Данная модель использовалась для оценки точности работы фазового пеленгатора с некоторыми ограничениями.

Предполагалось, что в формировании сигнала в месте приема участвуют только однократно переизлученные сигналы. В приемной антенной системе фазового пеленгатора одновременно присутствуют как прямой сигнал, так и все сигналы пришедшие от переизлучателей, расположенных в зоне видимости. При этом, прямой и переизлученные сигналы беспрепятственно доходят до каждой из приемных антенн.

При моделировании задавался массив точек переотражателей, падение и отражение сигнала от каждой точки с учётом задержек, фаз и углов падения. В качестве характеристик переотражателей использовались их нормированные диаграммы переизлучения и коэффициент ослабления сигнала по отношению к прямому сигналу, пришедшего с кратчайшего расстояния между источником радиоизлучения (ИРИ) и приемником.

Для определения величины смещения разности фаз и их СКО антенны фазового пеленгатора располагались на расстоянии $\pm d/2$ от начала координат и в процессе моделирования имитировалось их вращение в пределах $-90^0 < \alpha < 90^0$ в горизонтальной плоскости.

С учетом этих параметров производились расчеты разности фаз на выходе приемных устройств при повороте приемной антенной системы в пределах $-90^0 < 90^0$ с шагом в один градус относительно направления на ИРИ.

Моделировалось два режима работы пеленгатора для частоты сигнала ИРИ 10 ГГц.

Первый – наведенный режим, когда максимум диаграммы направленности антенны (ДНА) ИРИ был направлен на центр антенной системы фазового пеленгатора.

Второй – произвольно ориентированный режим, когда максимум ДНА ИРИ был ориентирован случайно относительно направления на центр антенной системы фазового пеленгатора в секторе углов от минус 90 до 90 .

Для наведенного режима работы пеленгатора на рис. 1 приведена зависимость усредненной разности фаз $\Delta\phi_{cp}$ от угла поворота антенной системы пеленгатора с антенными элементами в виде антенной решетки (АР) по 100 сеансам случайным сгенерированным выборкам сигнала ИРИ.

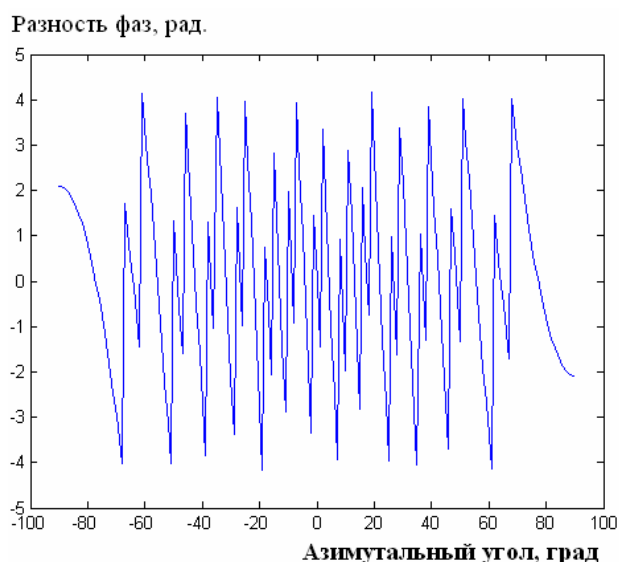


Рис.1 Зависимость усредненной разности фаз от угла поворота в приемной антенной системе пеленгатора при наведенном режиме

Для каждого сеанса рассчитывалась дисперсия отклонения разности фаз D_ϕ и смещение Δ_ϕ , полученные при моделировании относительно значений разности фаз, полученных при отсутствии искажений за счет распространения [4]:

$$D_\phi = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\phi_i - \Delta\phi_{cp})^2}{N} \quad (7)$$

$$\Delta_\phi = \Delta\phi_{cp} - \Delta\phi_{истн} \quad (8)$$

Значения СКО разности фаз σ_ϕ , полученные при моделировании в наведенном режиме по 100 сеансам для различных антенных систем показаны на рис. 2.

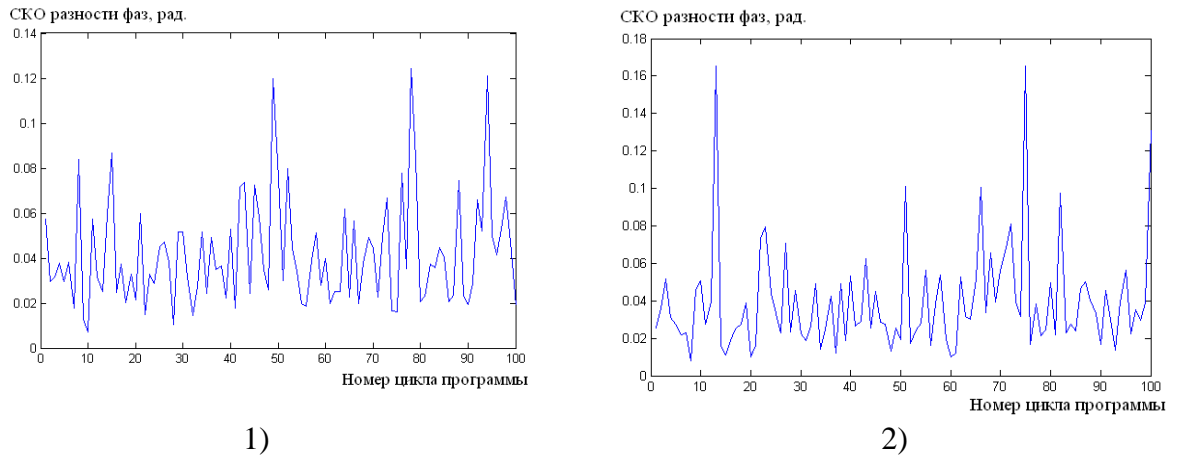


Рис.2 Значения СКО разности фаз σ_ϕ для фазового пеленгатора с AP (1) и квадратными рупорами (2)

На рис. 3 показаны СКО разности фаз, полученные при моделировании произвольно ориентированного режима по 100 сеансам для различных антенных систем.

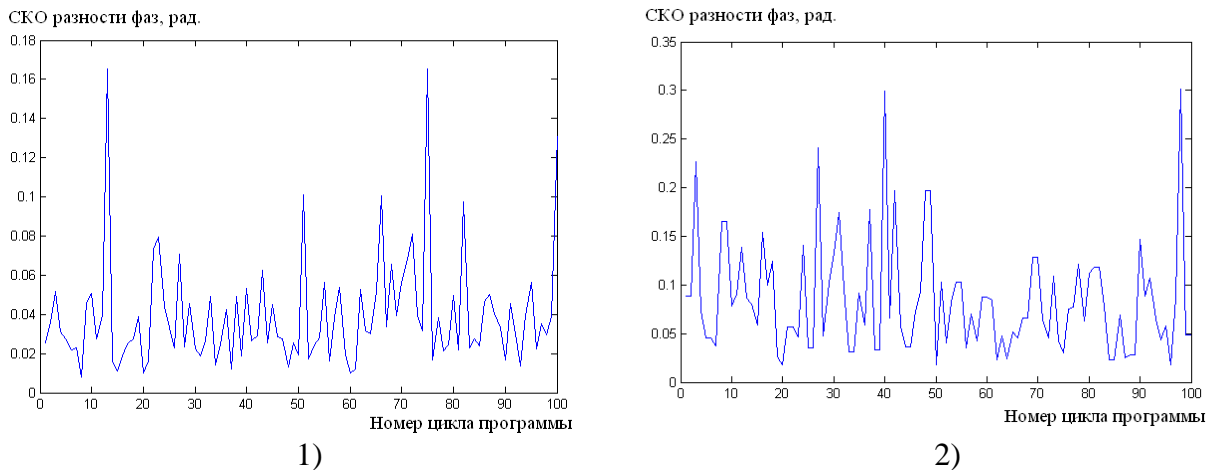


Рис.3 Значения СКО разности фаз σ_ϕ для фазового пеленгатора с AP (1) и квадратными рупорами (2) при произвольно ориентированном режиме

Усредненные по серии сеансов моделирования значения СКО разности фаз и смещения разности фаз, полученные с учетом заданных условий трасс распространения радиоволн для фазовых пеленгаторов с квадратными рупорами и AP из элементов Вивальди приведены в таблице 1.

Таблица 1 Средние значения СКО и смещения разности фаз

Тип режима моделирования	СКО разности фаз, град		Среднее смещение разности фаз, град	
	АР	Кв. рупоры	АР	Кв. рупоры
наведенный режим	2,41	2,29	-1,59	-2,76
произвольно ориентированный режим	5,67	4,85	-1,94	2,01

Для фазового пеленгатора полная ошибка разности фаз определялась по формуле [4]:

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\sigma_{FS}^2 + \Delta_{\varphi S}^2}, \quad (9)$$

где σ_{FS} – усредненное по серии циклов СКО разности фаз;

$\Delta_{\varphi S}$ – усредненное по серии циклов смещение разности фаз.

Ошибка пеленгования фазовым пеленгатором с базой L_B рассчитывалась по формуле [4]:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{\varphi}}{2\pi \frac{L_B}{\lambda} \cos \alpha} \quad (10)$$

Результаты расчетов (моделирования) полных ошибок пеленга фазовых пеленгаторов представлены в таблице 2. При расчете полной ошибки фазового пеленгатора значение базы было выбрано равным 400 мм.

Таблице 2 Результаты расчетов ошибок пеленга фазового пеленгаторов

Тип режима моделирования	Сектор фазового пеленгатора, град.	Ошибка пеленга, град.	
		АР	Рупор
наведенный режим	10	0,034	0,042
произвольно ориентированный режим	10	0,072	0,063

Из таблицы 2 видно, что полные ошибки пеленгования фазовым пеленгатором с квадратными рупорами и АР из элементов Вивальди при различных режимах имеют практически одинаковые значения. Это связано с тем, что одновременное изменение ширины д.н. обеих антенн фазового пеленгатора не влияет на ошибку пеленгования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проверки результатов оценки точности фазовых пеленгаторов с рупорными антеннами и антенными решетками из элементов Вивальди, полученных путем моделирования с использованием математической модели отражений импульсных радиосигналов от подстилающей земной поверхности, были проведены экспериментальные исследования в окрестностях Томска в трёхсантиметровом диапазоне на наземных трассах различной длины. Протяженность исследуемых трасс составляла 19 и 23,7 км, и они были ориентированы приблизительно в одном направлении относительно приёмной позиции.

Измерительная установка состояла из двух рупорно-параболических антенн и двух антенных решёток с элементами Вивальди, приёмников и системы записи сигналов на базе персонального компьютера. Поляризация сигнала на выходе рупорно-параболических антенн составляла 45° , а на выходе антенной решётки — вертикальная. Внешний вид антенной системы амплитудного пеленгатора показан на рис. 4. Подробное описание измерительной системы приведено в статье [5].

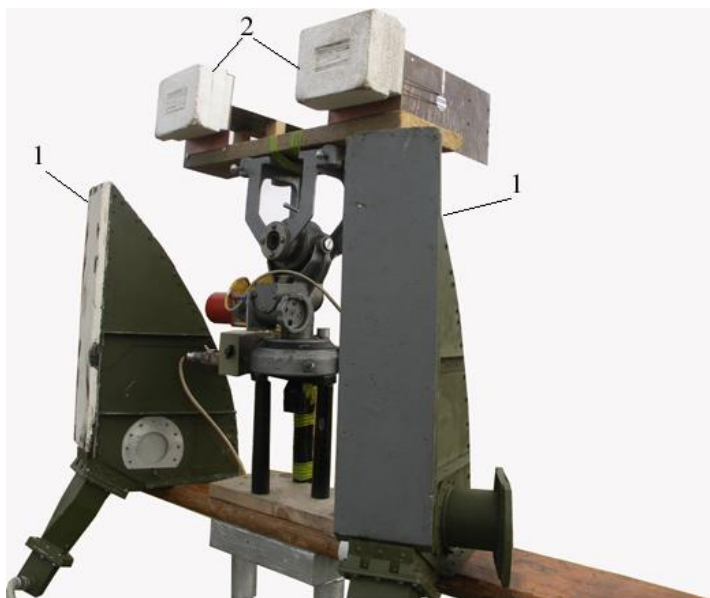


Рис. 4 Внешний вид антенной системы амплитудного пеленгатора
1 – рупорно-параболические антенны, 2 – АР из элементов Вивальди

Во время экспериментальных измерений положения антенн ИРИ и приёмного блока соответствовали тем же режимам работы фазового пеленгатора, что и при моделировании.

Исследование проводилось в течение двух недель. При этом погодные условия изменялись незначительно. РЛС излучала импульсный сигнал с линейной вертикальной поляризацией. Ширина диаграммы направленности антенны ИРИ на уровне -3 дБ составляла 3° .

В эксперименте измерения уровней импульсов проводились в виде сессий. Каждая измерительная сессия включала в себя цифровую запись квадратур принятого сигнала.

Продолжительность сессий составляла 60 секунд, что приводило к регистрации по 6000 фаз принятых сигналов в каждой.

В качестве иллюстрации на рис.5 показаны экспериментальные зависимости - разностно-фазовая характеристика АР из семи элементов Вивальди (1) и восстановленная в пределах ± 10 град от направления главного максимума разностно-фазовая характеристика (2).

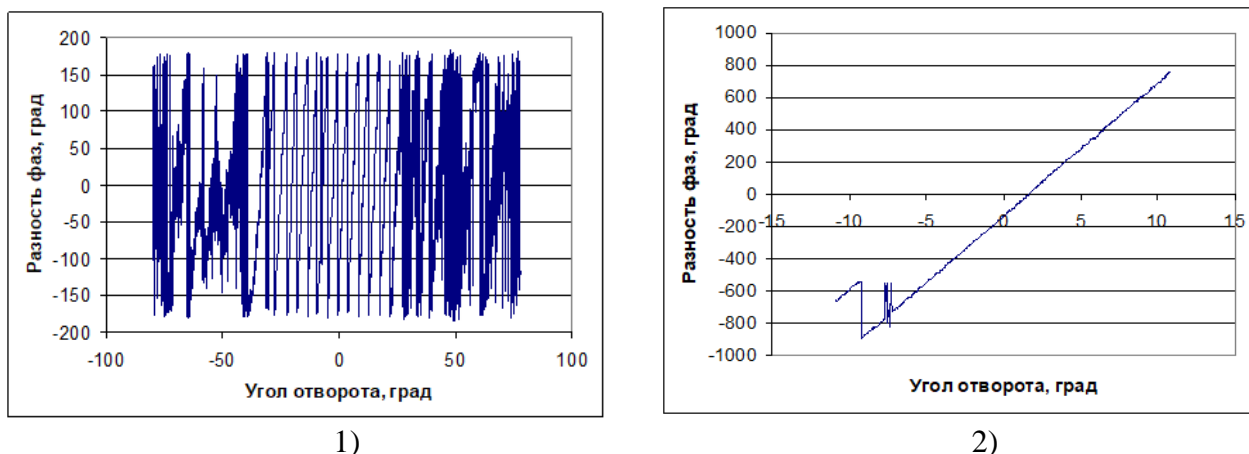


Рис.5 Экспериментальная разностно-фазовая характеристика АР из семи элементов Вивальди (1) и восстановленная в пределах ± 10 град от направления главного максимума (2).

Адекватность модели и достоверность численных значений проверялись анализом соответствия экспериментальных и рассчитанных величин СКО и смещения разности фаз фазового пеленгатора с различными типами антенных систем. Значения СКО разности фаз пеленгатора с двумя различными антенными системами на различных трассах приведены в таблице 3. СКО ошибки пеленга рассчитывались по формуле (10).

Расчетные и экспериментальные значения СКО разности фаз на различных трассах пеленгатора с двумя АР и квадратными рупорными антеннами приведены в таблице 3.

Таблица 3 Расчетные и экспериментальные значения СКО разности фаз на различных трассах пеленгатора с двумя АР и квадратными рупорными антеннами

Трасса	№ 1(19 км)	№ 2 (23,7 км)
Поляризация	Горизонт. (основная)	Горизонт. (основная)
Расчётное значение СКО разности фаз АР, градусы	4	3,34
Экспериментальное значение СКО разности фаз АР, градусы	3,39	2,41
Расчётное значение СКО разности фаз для рупорных антенн, градусы	4,38	4,14
Экспериментальное значение СКО разности фаз для рупорных антенн, градусы	3,51	2,74

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Использование предложенной многоточечной модели отражений от земной поверхности позволяет оценить ошибки пеленгования источников радиоизлучения фазовым пеленгатором на приземных трассах распространения радиоволн различной протяженности.

2. Антенная решетка с элементами Вивальди позволяет получить линейную разностно-фазовую характеристику в пределах ± 10 град от направления ее главного максимума, что позволяет применять их в фазовых пеленгаторах.

3. Экспериментальные исследования подтверждают применимость разработанной математической модели отражений импульсных сигналов от подстилающей земной поверхности для определения величины СКО и смещения разности фаз фазового пеленгатора с различными типами антенных систем, возникающих за счет условий ее распространения на трассах с заданными параметрами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEWM-2023-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Сколника. Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Книга 2 Москва: Техносфера, 2014. - 680 с.
2. Денисов В.П. Пространственно-временные искажения сантиметровых радиосигналов на наземных трассах распространения и их влияние на точность пассивных систем местоопределения. Томск, ТУСУР. 2014. 502 с.
3. A Model of Reflections of Pulsed Radio Signals from the Earth's Surface and Its Practical Use in Assessing the Accuracy of Amplitude Directional Finders / V. Kuprits, A. Mescheryakov, V. Gulko, V. Weber // Telecommunications and Radio Engineering. – 2023. – DOI 10.1615/telecomradeng.2023049602. – EDN FTNAWC.
4. Мещеряков А.А., Крутиков М.В., Куприц В.Ю., Сравнение эффективности методов пеленгования устройствами со слабонаправленными антеннами в условиях пересеченной местности, Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, №2 (22) часть 1, декабрь 2010.

5. Денисов В.П., Шарыгин Г.С., Крутиков М.В., Лебедев В.Ю., Мещеряков А.А., и др. Пространственно-временные искажения сантиметровых радиосигналов на наземных трассах распространения и их влияние на точность пассивных систем местоопределения : моногр. под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В.П. Денисова. - Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2014. - 502 с.

REFERENCES

1. Handbook of Radar / Ed. by M.I. Skolnik. Translated from English under the general editorship of B.S. Verba. In 2 books. Book 2 Moscow: Tekhnosfera, 2014. - 680 p.

2. Denisov V.P. Spatio-temporal distortions of centimeter radio signals on terrestrial propagation paths and their influence on the accuracy of passive positioning systems. Tomsk, TUSUR. 2014. 502 p.

3. A Model of Reflections of Pulsed Radio Signals from the Earth's Surface and Its Practical Use in Assessing the Accuracy of Amplitude Directional Finders / V. Kuprits, A. Meshcheryakov, V. Gulko, V. Weber // Telecommunications and Radio Engineering. – 2023. – DOI 10.1615/telecomradeng.2023049602. – EDN FTNAWC.

4. Meshcheryakov A.A., Krutikov M.V., Kuprits V.Yu., Comparison of the efficiency of direction finding methods using devices with weakly directional antennas in rugged terrain, Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, No. 2 (22) part 1, December 2010.

5. Denisov V.P., Sharygin G.S., Krutikov M.V., Lebedev V.Yu., Meshcheryakov A.A., Dubinin D.V., Voroshilin E.P., Geltser A.A., Kolyadin N.A., Kornienko V.G., Mukhomor K.E. Spatio-temporal distortions of centimeter radio signals on terrestrial propagation paths and their influence on the accuracy of passive positioning systems: monograph. edited by Doctor of Engineering Sciences, Professor V.P. Denisov. - Tomsk: Publishing House of Tomsk. State University of Control Systems and Radioelectronics, 2014. - 502 p.