

УСТРАНЕНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕЛЕНГОВ В МАЛОБАЗОВЫХ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ ПЕЛЕНГАТОРАХ ПУТЕМ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ «ВИРТУАЛЬНЫХ» БАЗ

Ю.Т. Карманов, И.И. Заляцкая

Рассмотрен алгоритм устранения неоднозначности пеленгования для фазовых пеленгаторов с числом пеленгационных антенных элементов не больше 3–5. Для получения однозначного значения оценки пеленга источника электромагнитного излучения (ИРИ) предлагается увеличить количество измерительных баз путем математических преобразований (суммирования, вычитания и т. п.) результатов измерений разностей фаз радиосигнала между парами антенн (базами) пеленгационной антенной решетки (АР). Полученные новые разности фаз соответствуют разностям фаз радиосигнала между физически не существующими «виртуальными» базами.

Приводятся результаты исследований эффективности алгоритма устранения неоднозначности пеленгования источника электромагнитного излучения малобазовым широкодиапазонным фазовым пеленгатором с использованием «виртуальных» баз.

Методами компьютерного моделирования показано, что в случаях, где существует жесткий дефицит пространства для размещения пеленгационной АР, и где требуется обработка радиосигналов в широкой полосе, в том числе и на радиочастотах свыше 5 ГГц, целесообразно применять алгоритм пеленгации, включающий дополнительные «виртуальные» базы.

Ключевые слова: алгоритм пеленгования, пеленгационная антенная решетка, фазовый алгоритм пеленгования, алгоритм устранения неоднозначности.

Введение

Пеленгаторы источников радиоизлучений (ИРИ) входят в состав современных широкодиапазонных системы радиолокации, радиомониторинга и радионавигации и во многом определяют их технические характеристики [1, 2].

К пеленгаторам предъявляются жесткие требования по ширине рабочего частотного диапазона пеленгуемых ИРИ, по размерам и числу антенн в пеленгационной антенной решетке (АР) [3]. Как правило, частотный диапазон составляет несколько октав, а пеленгационная решетка при размере в несколько десятков сантиметров содержит 3–5 антенных элементов.

В широком диапазоне частот амплитудные диаграммы направленности антенн (ДНА) пеленгационной решетки неконтролируемо изменяются, что является причиной широкого применения фазового метода определения пеленга в пеленгаторах. Но малое число антенн и небольшой размер пеленгационной решетки не позволяют сформировать в фазовом пеленгаторе количество измерительных баз достаточное для устранения неоднозначности пеленгования ИРИ в широком частотном диапазоне [4].

Кроме того приёмные каналы фазового пеленгатора в широком частотном диапазоне обладают высокой неидентичностью фазовых характеристик, для компенсации которых необходимо вводить в состав пеленгационной решетки дополнительную опорную антенну.

Помимо этого при проектировании малобазовых широкодиапазонных фазовых пеленгаторов возникает проблема устранения неоднозначности пеленгования ИРИ, обусловленная широким диапазоном частот радиосигналов, малым числом антенн и небольшим размером пеленгационной решетки.

В настоящей статье для устранения неоднозначности пеленгования предлагается увеличить количество измерительных баз путем математических преобразований (суммирования, вычитания и т. п.) результатов измерений разностей фаз радиосигнала между парами антенн (базами) пеленгационной АР. В результате появляются новые разности фаз, соответствующие разностям фаз радиосигнала между физически несуществующими «виртуальными» базами.

Безусловно, новые вычисленные разности фаз радиосигнала между парами «виртуальных» антенн (баз) не могут снизить ошибки пеленгования ИРИ, обусловленные действием шумов и помех. Но они могут помочь устранить неоднозначность пеленгования ИРИ в широком диапазоне частот, при малом числе «физических» антенн, т. е. при небольшом размере АР фазового пеленгатора.

В данной статье приводятся результаты исследований эффективности устранения неоднозначности пеленгования ИРИ малобазовым широкодиапазонным фазовым пеленгатором с использованием «виртуальных» баз.

1. Алгоритм пеленгования ИРИ с устранением неоднозначности измерения пеленгов путем формирования «виртуальных» баз

1.1. Исходные положения

Объектом исследования является широкодиапазонный фазовый пеленгатор с антенной системой в виде неэквидистантной линейной АР размером d_{Σ} с $(N+1)$ антеннами (рис. 1) [2].

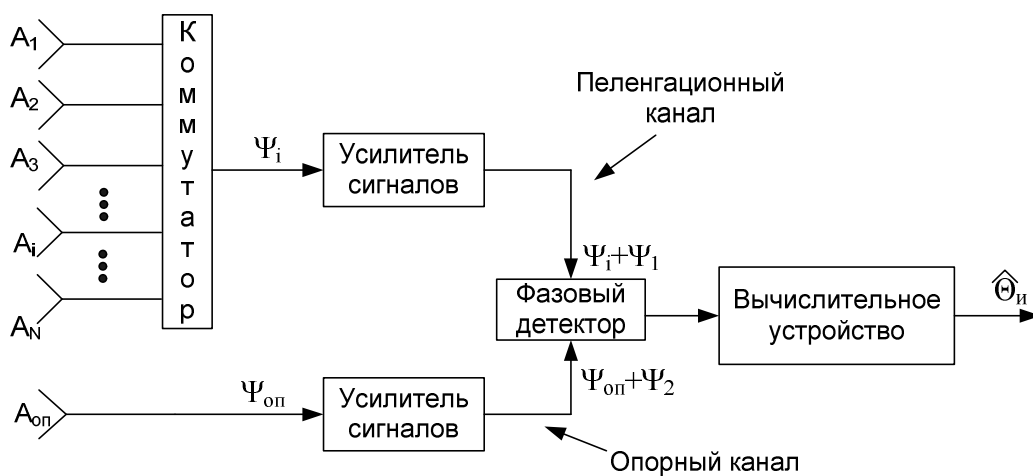


Рис. 1. Структурная схема фазового пеленгатора

Фазовый пеленгатор функционирует следующим образом:

– приём пеленгуемого радиосигнала производится на опорную антенну $A_{оп}$, расположенную на одном из концов АР и N -измерительных антенн A_1, A_2, \dots, A_N , расположенных на расстояниях $d_1 < d_2 < \dots < d_{N-1} < d_N = d_{\Sigma}$ от опорной антенны;

– выход опорной антенны подключен к входу усилителя сигналов опорного канала приёмника пеленгатора;

– выходы измерительных антенн A_1, A_2, \dots, A_N поочередно подключаются к входу усилителя пеленгационного канала приёмника пеленгатора;

– выходы усилителей сигналов приёмника подключены к цифровому фазометру, который измеряет разности фаз $\varphi_i(\Theta_u)$ между сигналами на выходах первого и второго канала приёмника пеленгатора и формирует комплексные величины $\dot{U}_i, i = 1, 2, \dots, N$:

$$\dot{U}_i = \exp\{j\varphi_i(\Theta_u)\};$$

$$\varphi_i(\Theta_u) = 2\pi \frac{d_i}{\lambda} \sin \Theta_u + \Psi_i - \Psi_{оп} + (\Psi_1 - \Psi_2) + \varphi_{шi}; \quad (1)$$

$$i = \overline{1, N},$$

где Θ_u – истинный пеленг источника ИРИ; d_i – расстояние между опорной и A_i антенной; λ – длина волны ИРИ; Ψ_i – паразитный набег фазы между антенной A_i и входом пеленгационного канала приёмника; $\Psi_{оп}$ – паразитный набег от антенны $A_{оп}$ до входа опорного канала приёмника; $(\Psi_1 - \Psi_2)$ – неидентичность фазовых характеристик каналов приёмника; $\varphi_{шi}$ – паразитный фазовый набег, обусловленный действием шума.

Действия шумов приёмника пеленгатора приводят к появлению дополнительного сдвига фазы $\varphi_{\text{ш}i}$ в измеряемых значениях $\varphi_i(\Theta_u)$. Согласно [5], $\varphi_{\text{ш}i}$ приблизительно являются нормальными случайными величинами с нулевым средним и дисперсией $\sigma_{\text{ш}i}^2$:

$$\sigma_{\text{ш}i}^2 \approx 2 \cdot P_{\text{ш}} / P_c, \quad (2)$$

где $P_{\text{ш}}/P_c$ – отношение сигнал-шум на выходе канала приёмника пеленгатора.

С целью компенсации неидентичностей фазовых характеристик приёмника пеленгатора ($\Psi_1 - \Psi_2$) преобразуем совокупность измеренных величин \dot{U}_i в комплексные величины \dot{U}_{km} по алгоритму, предложенному в [6]:

$$\begin{cases} \dot{U}_{km} = \dot{U}_k \cdot \dot{U}_m; \quad m < k; \quad k, m = \overline{1, N}; \\ \dot{U}_{km} = \exp \left\{ j \left[\varphi_k(\Theta_u) - \varphi_m(\Theta_u) \right] \right\} = \exp \left\{ j \left[2\pi \frac{d_{km}}{\lambda} \sin \Theta_u + (\varphi_{\text{ш}k} - \varphi_{\text{ш}m}) + (\Psi_k - \Psi_m) \right] \right\}. \end{cases} \quad (3)$$

В результате преобразований величины \dot{U}_{km} не зависят от неидентичностей фазовых характеристик каналов приёмника пеленгатора и соответствуют измерениям разностей фаз между k -й и m -й антеннами пеленгационной антенной решетки с расстоянием между ними равным $d_{km} = d_k - d_m$, $k, m = \overline{1, N}$.

1.2. Алгоритм формирования дополнительных «виртуальных» баз

В ситуации, когда возможно размещение лишь малоразмерной пеленгационной АР ($N \sim 3-4$), одних «физических» пеленгационных баз недостаточно для однозначного определения пеленга Θ_u в широком частотном диапазоне. Кроме того, при пеленговании ИРИ на частотах свыше 8–10 ГГц расположить пеленгационные антенные элементы (АЭ) для получения однозначной пеленгационной базы практически невозможно.

Если количество антенн в пеленгационной АР достаточно большое, то по совокупности измеренных величин можно однозначно получить пеленг Θ_u на ИРИ [7]. Если антенн недостаточно, необходимо, используя совокупность величин $\{\dot{U}_{km}\}$, математически сформировать дополнительную совокупность величин $\{\dot{U}_l\}$, $l = \overline{1, L}$ по следующему алгоритму:

$$\begin{cases} \dot{U}_l = \prod_{k=1}^N \prod_{0 < m < k} [\dot{U}_{km}]^{a_{km}(l)}; \\ \dot{U}_l = \prod_{k=1}^N \prod_{0 < m < k} [\dot{U}_k \cdot \dot{U}_m]^{a_{km}(l)}; \\ \dot{U}_l = \exp \left\{ j \sum_{k=1}^N \sum_{0 < m < k} a_{km}(l) \cdot [\varphi_k(\Theta_u) - \varphi_m(\Theta_u)] \right\}; \\ \dot{U}_l = \exp \left\{ j \sum_{k=1}^N \sum_{0 < m < k} a_{km}(l) \cdot \left[2\pi \frac{d_{km}}{\lambda} \sin \Theta_u + (\Psi_k - \Psi_m) + (\varphi_{\text{ш}k} - \varphi_{\text{ш}m}) \right] \right\}; \\ \dot{U}_l = \exp \left\{ j \left[2\pi \frac{\tilde{d}_l}{\lambda} \sin \Theta_u + \Delta\Psi_l \right] \right\}; \\ l = \overline{1, L}, \end{cases} \quad (4)$$

где $\Delta\Psi_l = \sum_{k=1}^N \sum_{0 < m < k} a_{km}(l) \cdot [\Psi_k - \Psi_m] + (\varphi_{\text{ш}k} - \varphi_{\text{ш}m})$ – некомпенсируемая погрешность измерения фазы, обусловленная неидентичностью фазовых характеристик и действием шумов каналов при-

ёмника пеленгатора; $\{a_{km}(l)\}$ – совокупность действительных чисел, определяющих дополнительную «виртуальную» базу с длиной \tilde{d}_l равной

$$\tilde{d}_l = \sum_{k=1}^N \sum_{0 < m < k} a_{km}(l) \cdot d_{km} = \sum_{k=1}^N \sum_{0 < m < k} a_{km}(l) \cdot [d_k - d_m]. \quad (5)$$

Алгоритм (5) позволяет сформировать сколь угодно большое количество «виртуальных» баз. Однако их практическое использование ограничено следующими обстоятельствами.

Во-первых, следует иметь в виду, что фактически разности фаз измеряются с точностью до 2π . Поэтому, для обеспечения независимости измерений разностей фаз по «виртуальным» базам от неконтролируемого набега фаз кратных 2π , следует использовать в (5) коэффициенты $\{a_{km}(l)\}$ в виде целых чисел.

Во-вторых, случайность величин Ψ_i, Ψ_j в выражении (1) для $\Delta\varphi_{ij}(\Theta_u)$ обуславливает случайность «виртуальных» разностей фаз $\Delta\tilde{\varphi}_l(\Theta_u)$. Использование дополнительных виртуальных баз может быть эффективным, если дисперсии $D[\Delta\tilde{\varphi}_l(\Theta_u)]$ ненамного больше дисперсий физических разностей фаз $D[\Delta\varphi_{ij}(\Theta_u)]$, т. е. при выполнении условия

$$D[\Delta\tilde{\varphi}_l(\Theta_u)] \leq \sqrt{\frac{d_\Sigma}{\tilde{d}_l}} \cdot D[\Delta\varphi_{ij}(\Theta_u)]. \quad (6)$$

На основе выражения (5) и предположения статистической независимости набегов фаз $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_N$ алгоритм выбора эффективных «виртуальных» баз можно записать в виде

$$D[\Delta\tilde{\varphi}_l(\Theta_u)] = \sum_{i=1}^N D[\Delta\varphi_{ij}(\Theta_u)] \cdot \left[\sum_{j=1}^{i-1} a_{ij}(m) - \sum_{j=i+1}^N a_{ji}(m) \right]^2. \quad (7)$$

На основе всех вышеперечисленных рассуждений можно сформулировать следующие рекомендации для выбора «виртуальных» баз:

- следует выбирать те длины «виртуальных» баз (a , следовательно, и значения коэффициентов $a_{ij}(m)$), которые трудно реализуемы физически, например, 20...10 мм, этот шаг приведет к расширению рабочего диапазона и устранению неоднозначности определения пеленга ИРИ;
- из-за наличия неидентичности фазовой характеристики каналов приемника, шума на входе и т. д. не следует выбирать базы длиной менее 5 мм
- при выборе $a_{ij}(m)$ следует руководствоваться ограничением на $D[\Delta\tilde{\varphi}_l(\Theta_u)]$ (6).

1.3. Алгоритм пеленгования ИРИ с устранением неоднозначности измерения пеленга с использованием дополнительных виртуальных баз

Алгоритм пеленгования ИРИ малобазовым широкодиапазонным фазовым пеленгатором осуществляться поэтапно. Предлагаемый алгоритм основан на широко известном алгоритме вычисления массива неоднозначных пеленгов по самой большой базе и уточнение пеленга по меньшей базе [7, 8] с добавлением вычисления фаз и длин «виртуальных» баз пеленгатора.

На первом этапе осуществляется обнаружение сигнала ИРИ и измерение его длины волны λ по известным алгоритмам [9, 10]. Кроме того, на этом этапе измеряются разности фаз $\varphi_i(\Theta_u)$, $i = \overline{1, N}$ между опорной АЭ и пеленгационными антеннами. Из них формируются разности фаз по физическим базам и «виртуальным базам».

На втором этапе, исходя из значения λ , выбирается однозначная пеленгационная база из массива физических и виртуальных баз пеленгатора (4). Выбор однозначной пеленгационной базы обусловлен несколькими факторами:

- однозначной является база, для которой выполняется условие

$$d_{ij} \geq 2\lambda; \quad (8)$$

– для повышения точности рекомендуется из массива однозначных баз пеленгатора выбирать наиболее длинную.

Пример выбора баз для определенной частоты ИРИ приведен в таблице.

На третьем этапе производится вычисление массива неоднозначных пеленгов для самой длинной и точной физической базы пеленгационной антенной решетки d_{Σ} . Далее производится устранение неоднозначности посредством вычисления оценки по меньшей базе, выбранной на втором этапе.

2. Исследование эффективности использования виртуальных баз для устранения неоднозначности определения пеленга ИРИ

малобагабритными широкодиапазонными фазовыми пеленгаторами

В настоящем разделе методами математического моделирования исследуется эффективность использования виртуальных пеленгационных баз для устранения неоднозначности определения пеленга ИРИ по описанному в разделе 1.3 алгоритму, работающих в диапазоне от 1 ГГц до 15 ГГц, двухканальным фазовым пеленгатором с четырехантенной линейной пеленгационной решеткой размером 12 см. На рис. 2 схематически изображено расположение антенных элементов пеленгационной АР.

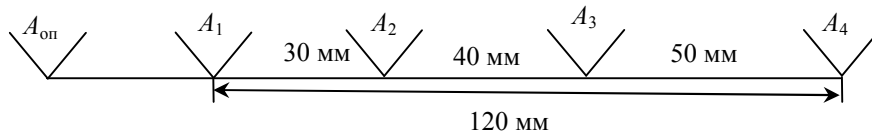


Рис. 2. Расположение пеленгационных элементов АР

АР (см. рис. 2) позволяет получить шесть физических пеленгационных баз:

- первая пеленгационная база образована АЭ A_1 и A_4 , ее длина составляет 120 мм;
- вторая база образована АЭ A_2 и A_4 , имеет длину 90 мм;
- третья база образована АЭ A_1 и A_3 , имеет длину 70 мм;
- четвертая база образована АЭ A_3 и A_4 , имеет длину 50 мм;
- пятая база образована АЭ A_2 и A_3 , имеет длину 40 мм;
- шестая база образована АЭ A_1 и A_2 , имеет длину 30 мм.

В таком пеленгаторе однозначное пеленгование ИРИ только с использованием физических баз возможно в диапазоне частот до 5 ГГц (см. таблицу). В диапазоне частот 5...15 ГГц однозначность измерения пеленга не обеспечивается. Для расширения диапазона рабочих частот были введены виртуальные пеленгационные базы, которые физически получить невозможно:

– первая виртуальная база имеет длину 20 мм и сформирована следующим образом:

$$\Delta\tilde{\varphi}_{20} = \Delta\varphi_{34} - \Delta\varphi_{12}; \tag{9}$$

– вторая виртуальная база имеет длину 10 мм и сформирована так:

$$\Delta\tilde{\varphi}_{10} = \Delta\varphi_{23} - \Delta\varphi_{12}. \tag{10}$$

Зависимость СКО неидентичности фазовой характеристики от длины волны ИРИ λ в диапазоне частот 1...15 ГГц

d_{ij}	λ , мм	f , ГГц	СКО паразитных фазовых набегов	
			$\sigma_{\varphi^{\circ}}=5^{\circ}$	$\sigma_{\varphi^{\circ}}=7^{\circ}$
120	$330 < \lambda < 240$	$1 < f < 1,25$	$1,59^{\circ}$	$2,23^{\circ}$
90	$180 < \lambda < 240$	$1,25 < f < 1,7$	$1,59^{\circ} \dots 2,13^{\circ}$	$2,23^{\circ} \dots 3^{\circ}$
70	$140 < \lambda < 180$	$2 < f < 2,1$	$1,59^{\circ} \dots 2,05^{\circ}$	$2,23^{\circ} \dots 2,87^{\circ}$
50	$100 < \lambda < 140$	$2,1 < f < 3$	$1,59^{\circ} \dots 2,23^{\circ}$	$2,23^{\circ} \dots 3,12^{\circ}$
40	$80 < \lambda < 100$	$3 < f < 3,75$	$1,59^{\circ} \dots 2^{\circ}$	$2,23^{\circ} \dots 2,8^{\circ}$
30	$60 < \lambda < 80$	$3,75 < f < 5$	$1,59^{\circ} \dots 2,13^{\circ}$	$2,23^{\circ} \dots 3^{\circ}$
20	$40 < \lambda < 60$	$5 < f < 7,5$	$2,25^{\circ} \dots 3,4^{\circ}$	$3,15^{\circ} \dots 4,76^{\circ}$
10	$20 < \lambda < 40$	$7,5 < f < 15$	$2,25^{\circ} \dots 4,5^{\circ}$	$3,15^{\circ} \dots 6,3^{\circ}$

Введение «виртуальных» баз сопровождается увеличением СКО паразитных фазовых набегов по сравнению с физическими базами. В таблице приведены расчеты СКО паразитных фазовых набегов при двух значениях неидентичностей фазовых характеристик каналов приёмника. В первом столбце таблицы приведены длины баз АР с размерами, приведенными на рис. 2. При этом базы с длинами $d_{ij} > 30$ мм являются физическими, а базы с длинами 10 и 20 мм – «виртуальными». Во втором столбце приведены границы длин волн λ и диапазон частот f однозначно пеленгуемых радиосигналов ИРИ.

Расчеты показывают, что введение в расчеты «виртуальных» баз сопровождается увеличением СКО паразитных фазовых набегов в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с физическими. Однако, использование в данном случае «виртуальных» баз позволяет устранить неоднозначность пеленгования ИРИ в диапазоне частот 5...15 ГГц и фактически расширить диапазон частот, где возможно однозначное определение пеленга, в три раза. Кроме того, увеличение величины ошибки измерения фазы лежит в допустимых пределах условия (6).

При исследовании точность пеленгования будем оценивать величиной [2]:

$$\xi = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Theta_i - M(\Theta_i))^2}, \quad (11)$$

где ξ – случайная составляющая ошибки вычисления пеленга; n – количество элементов выборки (проведенных исследований); Θ_i – вычисленный пеленг; $M(\Theta_i)$ – математическое ожидание выборки вычисленных пеленгов.

Значения ошибки измерения пеленга в пределах рабочего диапазона углов $[-45^\circ; 45^\circ]$ изменяются в пределах десятых долей градуса, поэтому в зависимостях приведены усредненные значения (рис. 3).

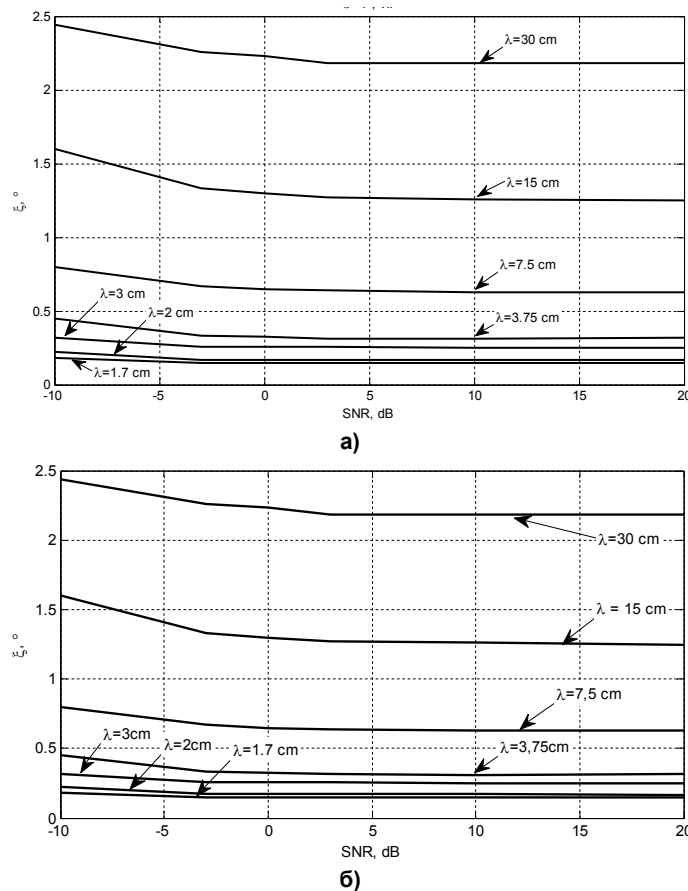
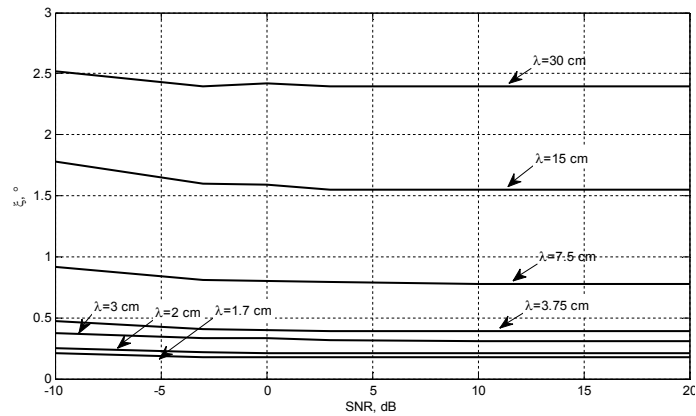
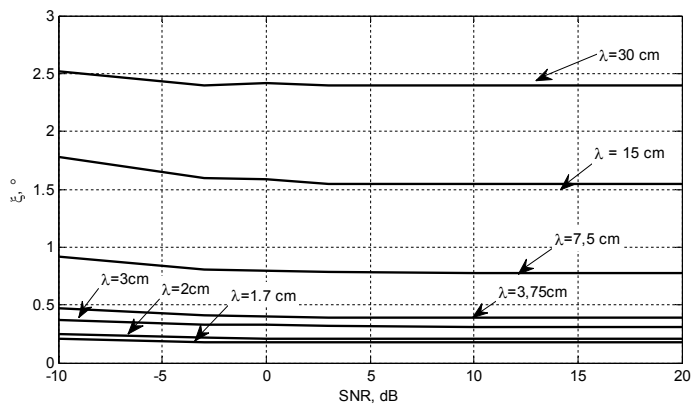


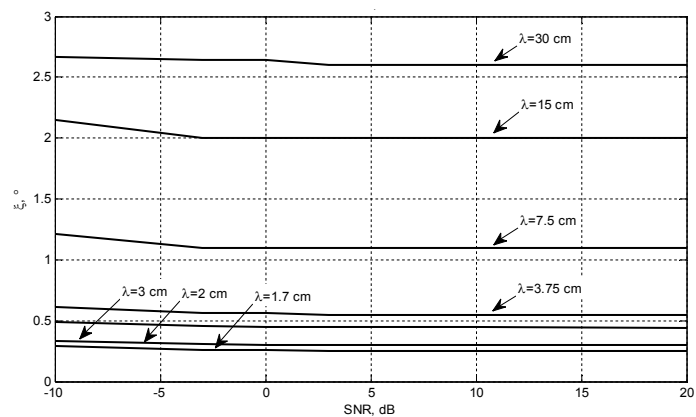
Рис. 3. Зависимости ошибки определения пеленга ξ от ОСШ: а, в, д – при использовании в алгоритме виртуальных баз при СКО неидентичности фазовой характеристики 4° , 5° и 7° соответственно; б, г, е – без использования в алгоритме виртуальных баз при СКО неидентичности фазовой характеристики 4° , 5° и 7° соответственно (см. также с. 17)



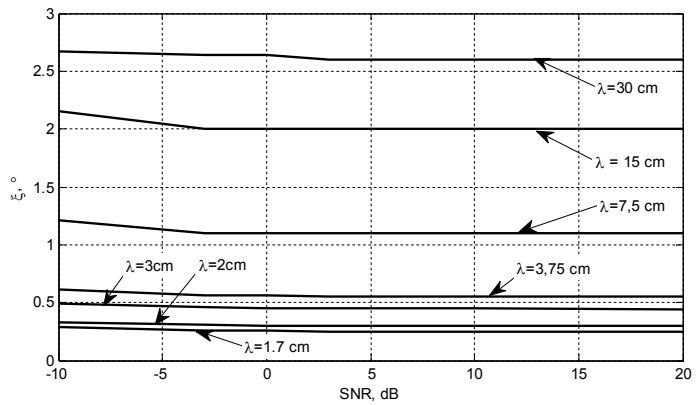
а)



б)



в)



г)

д)

Рис. 3. Окончание

Из зависимостей на рис. 3 можно сделать вывод: для всех исследуемых длин волн добавление виртуальных баз пеленгатора не значительно уменьшило точность определения пеленга, поскольку точность пеленгования ИРИ определяется неоднозначной базой с длиной 120 мм.

При значении ОСШ более 3 дБ точность оценки пеленга определяется значением СКО неидентичности фазовых характеристик каналов приёмника (см. рис. 3) и влиянием шумов можно пренебречь.

Исследование влияния введения «виртуальных» баз на вероятность однозначного определения пеленга $P_{од}$ было проведено при СКО неидентичности фазовой характеристики 4; 5 и 7°, при ОСШ от -10 до +20 дБ. Было получено, что $P_{од}$ слабо зависит от фазовой неидентичности каналов приёмника и ОСШ и в основном определяется длиной волны ИРИ λ , а также конфигурацией АР. Кривые на рис. 4 отображают зависимости $P_{од}$ от длины волны ИРИ λ в случае использования «виртуальных» баз и без них.

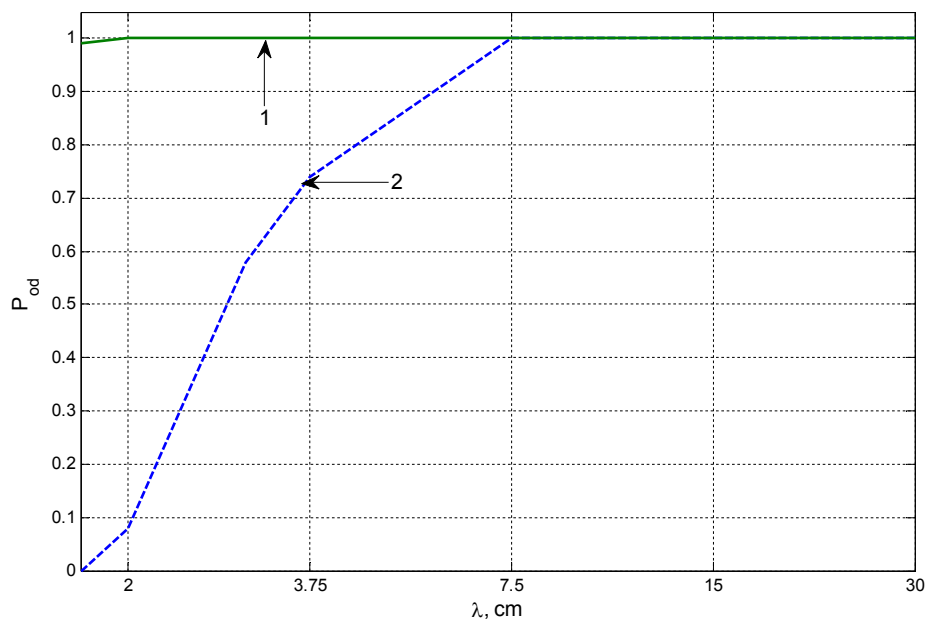


Рис. 4. Зависимости $P_{од}$ от λ : 1 – при использовании виртуальных баз; 2 – без использования виртуальных баз

Вероятность правильного однозначного пеленгования ИРИ без использования виртуальных баз только в диапазоне длин волн от 30 до 7,5 см близка к 1, для меньших длин волн $P_{од}$ значительно уменьшается от 0,8 до 0. При использовании «виртуальных» баз вероятность однозначного определения пеленга не уменьшается ниже значения 0,95 для всех длин волн на всем исследованном диапазоне значений ОСШ и СКО фазовой неидентичности. Это свидетельствует о высокой эффективности использования «виртуальных» баз в задачах устранения неоднозначности пеленгования ИРИ малобазовыми фазовыми пеленгаторами в широком диапазоне частот.

Заключение

Исследуемый алгоритм однозначного определения пеленга ИРИ с формированием дополнительных «виртуальных» баз позволяют существенно (в разы) расширить диапазон рабочих частот однозначного пеленгования ИРИ малобазовыми фазовыми пеленгаторами с небольшим числом пеленгационных антенн с незначительным ухудшением точности пеленгования. При этом вероятность однозначного определения пеленга $P_{од}$ близка к единице и в основном определяется числом и расположением элементов пеленгационной АР и длиной волны ИРИ λ .

Таким образом, в ситуациях, где существует жесткий дефицит пространства для размещения пеленгационной АР и где требуется обработка на радиочастотах свыше 5 ГГц, целесообразно применять алгоритмы пеленгации, включающие дополнительные «виртуальные» базы.

Литература

1. Конахович, Г.Ф. *Специальный радиомониторинг* / Г.Ф. Конахович, В.П. Бабак, В.М. Фисенко. – М.: МК-Пресс: Додэка-XXI, 2007. – 384 с.
2. Рембовский, А.М. *Радиомониторинг: задачи, методы и средства* / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 492 с.
3. Анализ перспективных направлений развития методов оценки угловых координат источников радиоизлучения / А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин, В.В. Негроров и др. // *Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та.* – 2009. – Т. 5, № 9. – С. 47–55.
4. Исследование работы фазового пеленгатора с квазиоптимальным устранением неоднозначности на наземных трассах / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, М.В. Крутиков, А.А. Мещеряков // *Докл. Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники.* – 2011. – № 2 (24), ч. 1. – С. 7–15.
5. Левин, Б.Р. *Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая* / Б.Р. Левин – М.: Советское радио, 1974. – 552 с.
6. Пат. 2096797 Российская Федерация. *Способ пеленгации радиосигналов и многоканальный пеленгатор* / А.М. Рембовский, В.Н. Кондратенко. – Заявл. 04.07.1996; опублик. 20.11.1997.
7. Денисов, В.П. *Фазовые радиопеленгаторы* / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: ТУСУР, 2002. – 251 с.
8. Lipsky, Stephen E. *Microwave passive direction finding* / Stephen E. Lipsky. – Raleigh, USA: SciTech Publishing, Inc., 2004. – 320 p.
9. Карманов, Ю.Т. *Непараметрическое обнаружение узкополосного радиосигнала с неизвестной несущей частотой на фоне гауссовских шумов* / Ю.Т. Карманов, А.Н. Николаев // *Вестник ЮУрГУ. Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника».* – 2009. – № 26 (159). – С. 38–40.
10. Николаев А.Н. *Цифровые технологии в широкополосных приемниках СВЧ радиосигналов* // *Вестник ЮУрГУ. Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника».* – 2012. – № 35. – С. 30–34.

Карманов Юрий Трофимович, д-р техн. наук, профессор, директор НИИ цифровых систем обработки и защиты информации, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); ea@drts.susu.ac.ru.

Заляцкая Инна Ивановна, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); inna-ya@list.ru.

Поступила в редакцию 14 ноября 2014 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”
2015, vol. 15, no. 1, pp. 11–20

**DISAMBIGUATION OF MEASUREMENT OF BEARINGS
IN LESSBASES WIDERANGE DIRECTION FINDERS
BY ALGORITHMIC CREATION OF ADDITIONAL “VIRTUAL” BASE**

Yu.T. Karmanov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
ea@drts.susu.ac.ru,

I.I. Zalyatskaya, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
inna-ya@list.ru

An algorithm of disambiguation is presented for phase direction finders with direction-finding antenna elements no more than 3–5. Increase the number of measurement bases by mathematical transformations (addition, subtraction, etc.) of the results of mea-

surements of the phase differences between the antenna pairs (bases) DF antenna array is proposed to obtain a unique value estimation bearing source of electromagnetic radiation. The received new differences of phases correspond to the differences between the phases of the radio signal that is not physically existing and called “virtual” antenna pairs (bases).

This article presents the results of researches of algorithm effectiveness of disambiguation of bearing of electromagnetic radiation source by wide-range phase direction finder with use of “virtual” bases.

According to the results of computer simulation it is advisable to apply the DF algorithm, including additional “virtual” bases in cases where there is a shortage of space for tight placement DF antenna array and processing radio signals in a wide band including frequencies over 5 GHz is required.

Keywords: algorithm of direction finding, phase direction finding, disambiguation algorithm, direction finding antenna array.

References

1. Konakhovich G.F. *Spetsial'nyy radiomonitoring* [Special Radio Monitoring]. Moscow, “МК-Press”, Publ., “Dodeka-XXI”, 2007. 384 p.
2. Rembovskiy A.M. *Radiomonitoring: zadachi, metody i sredstva* [Radio Monitoring: Tasks, Methods and Tools]. Moscow, Goryachay linia – Telekom, 2006. 492 p.
3. Ashikhmin A.V., Kozmin V.A., Negrobov A.V., Pasternak Yu.G., Rembovsky Yu.A. [The Analysis of Perspective Development Directions of the Angular Coordinates' Estimation Methods of Radio Emission Sources]. *Bulletin of Voronezh State Technic University*, 2009, vol. 5, no. 9, pp. 47–55. (in Russ.)
4. Denisov V.P., Dubinin D.V., Krutikov M.V., Meshcheryakov A.A. [Investigation of Phase Direction Finder with Quasi-Optimal Disambiguation on Land Tracks]. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics*, 2011, vol. 2 (24), pp. 7–15. (in Russ.)
5. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. Kniga pervaya* [Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering. The First Book]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1974. 552 p.
6. Rembovskiy A.M., Kondratenko V.N. *Sposob pelengatsii radiosignalov i mnogokanal'nyy pelengator* [Radiosignal Direction Finding Way and Multichannel Direction Finding]. Patent of Russian Federation no. 2096797 20.11.1997.
7. Denisov V.P. *Fazovye radiopelengatory* [Phase Direction Finders]. Tomsk, TUSUR Publ., 2002. 251 p.
8. Lipsky Stephen E. *Microwave Passive Direction Finding*. Raleigh, USA, SciTech Publishing, Inc., 2004. 320 p.
9. Karmanov Ju.T., Nikolaev A.N. [Nonparametric Detection of Narrowband Radio Signal with Unknown Carrier in Gaussian Noise]. *Bulletin of South Ural State University. Serial 'Computer Technology, Control and Radio Electronics'*, 2009, vol 26, pp. 38–40. (in Russ.)
10. Nikolaev A.N. [Digital Technology in Wideband Microwave Ultrahigh Frequency Radio Receivers]. *Bulletin of South Ural State University . Serial 'Computer Technology, Control and Radio Electronics'*, 2012, vol. 35, pp. 30–34. (in Russ)

Received 14 November 2014