

УДК 621.396.96

В.П. Денисов, М.В. Крутиков, В.Ю. Лебедев, М.П. Скородумов

Совместная обработка ортогонально поляризованных сигналов в фазовых пеленгаторах систем радиомониторинга*

Рассматривается максимально правдоподобная оценка пеленга в фазовых пеленгаторах, работающих на наземных трассах и осуществляющих раздельный прием ортогонально поляризованных сигналов. Основой для анализа являются экспериментальные исследования в трехсантиметровом диапазоне волн, в которых использовался импульсный источник излучения с направленной сканирующей антенной.

Ключевые слова: пеленг, поляризация, взвешивание, дисперсия разности фаз, наземная трасса, экспериментальные исследования.

В системах радиомониторинга требуется обнаруживать и пеленговать источники сигналов с неизвестной поляризацией излучения. Для гарантированного выполнения поставленных целей в подобных системах ведется раздельный прием сигналов, ортогональных по поляризации, путем использования отдельных антенных систем. Возникает задача совместной обработки принятых сигналов с целью обеспечения максимально возможной точности пеленгования. Её решение рассматривается в работе [1] применительно к фазовому пеленгатору, работающему по импульсному источнику радиоизлучения с направленной сканирующей антенной, когда прием осуществляется как по ее основному, так и боковому излучению. В этом случае поляризация электромагнитного поля в месте приема изменяется по двум причинам. Во-первых, вследствие сканирования направленной антенны в максимумах диаграммы излучения на основной поляризации имеется минимум на ортогональной, и наоборот. Во-вторых, вследствие переотражений сигналов на трассе распространения радиоволн происходит деполяризация сигналов, которая носит случайный характер.

В работе [1] использовались антенные системы, обеспечивающие раздельный прием сигналов вертикальной и горизонтальной поляризации с фазометрическими базами 18 и 90 см. Антенные системы и условия проведения экспериментов кратко описаны в статье [2]. В измерениях, проведенных на наземных трассах протяженностью 16,4 и 29 км, поляризационное отношение, определенное как $\rho = U_B/U_\Gamma$, где U_B – амплитуда сигнала в канале вертикальной поляризации, U_Γ – амплитуда сигнала в канале горизонтальной поляризации, изменялось при круговом сканировании излучающей антенны в пределах ± 40 дБ.

В работе [1] разности фаз на базе 90 см в каналах вертикальной и горизонтальной поляризации приема после устранения неоднозначности измерений совместно использовались для максимально правдоподобной оценки пеленга. Вычисления пеленга α выполнялись по формуле

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{1}{2\pi l} \left(\frac{\varphi_B}{1 + \sigma_B^2/\sigma_\Gamma^2} + \frac{\varphi_\Gamma}{1 + \sigma_\Gamma^2/\sigma_B^2} \right) \right], \quad (1)$$

где λ – длина волны; l – база пеленгатора; φ_Γ и σ_Γ^2 – разность фаз и ее дисперсия на выходе «горизонтально поляризованного канала пеленгатора»; φ_B и σ_B^2 – разность фаз и ее дисперсия на выходе «вертикально поляризованного канала пеленгатора».

Как видно из формулы (1), поляризационная обработка сводится к получению средневзвешенной разности фаз по принятым сигналам ортогональных поляризаций

$$\varphi = \frac{\varphi_B}{1 + \gamma^2} + \frac{\varphi_\Gamma}{1 + \gamma^{-2}}, \quad (2)$$

где $\gamma = \sigma_B/\sigma_\Gamma$.

Там же предложено оценивать γ по измеренному поляризационному отношению ρ , и на основе экспериментальных данных получено

* Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». Государственный контракт № 02.740.11.0232.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{в}}^2(\gamma) &= 3 \cdot 10^{-4} \rho^{-2} \text{ рад}^2, \\ \sigma_{\text{г}}^2(\gamma) &= 3 \cdot 10^{-4} \rho^2 \text{ рад}^2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

так что

$$\gamma = \rho^{-2}. \quad (4)$$

Соотношение (4) не нашло в работе [1] достаточного статистического обоснования. Цель настоящей статьи – уточнить соотношение (4) на большем объеме статистического материала, учитывая влияние на $\sigma_{\text{в}}^2$, $\sigma_{\text{г}}^2$ внутренних шумов приемных устройств.

Допустим, что фазовые погрешности вызываются только аддитивными гауссовыми шумами (АГШ) в приемных трактах пеленгатора, которые имеют одинаковые дисперсии $\sigma_{\text{ш}}^2$ в полосе пропускания и статистически независимы. Тогда дисперсия фазовой погрешности $\sigma_{\text{в}}^2$ в каналах приема сигналов вертикальной поляризации и дисперсия фазовой погрешности $\sigma_{\text{г}}^2$ в каналах приема сигналов горизонтальной поляризации [3]

$$\sigma_{\text{в}}^2 = \frac{2\sigma_{\text{ш}}^2}{U_{\text{в}}^2} = \frac{1}{q_{\text{в}}^2}, \quad \sigma_{\text{г}}^2 = \frac{2\sigma_{\text{ш}}^2}{U_{\text{г}}^2} = \frac{1}{q_{\text{г}}^2}. \quad (5)$$

Таким образом,

$$\gamma = \frac{\sigma_{\text{в}}^2}{\sigma_{\text{г}}^2} = \left(\frac{U_{\text{г}}}{U_{\text{в}}} \right)^2 = \rho^{-1}. \quad (6)$$

и выражение (2) приобретёт вид

$$\varphi = \frac{\varphi_{\text{в}}}{1 + \rho^{-2}} + \frac{\varphi_{\text{г}}}{1 + \rho^2}. \quad (7)$$

Соотношения (5) справедливы при $q_{\text{в}}^2 \geq 2 \div 3$, $q_{\text{г}}^2 \geq 2 \div 3$, когда распределение фазовых погрешностей можно считать нормальным [3]. Эти ограничения действуют и относительно формулы (7).

На практике, кроме теплового шума приемников, на погрешность оценивания разности фаз влияют сигналы, рассеянные подстилающей поверхностью трассы. Погрешность оценивания разности фаз увеличивается с ростом доли рассеянных сигналов в суммарном сигнале в точке приема. Количественные оценки могут быть даны экспериментальным путем.

Экспериментальные исследования зависимостей $\sigma_{\text{в}}(q_{\text{в}})$, $\sigma_{\text{г}}(q_{\text{г}})$ были проведены на двух наземных трассах протяженностью 16,4 и 29 км в трехсантиметровом диапазоне радиоволн с помощью радиофизического комплекса [2] в сканирующем режиме работы передатчика при двух поляризациях излучения. Обе трассы закрытого типа с расстоянием до препятствия со стороны передатчика 2 км и 900 м, соответственно, при этом трасса 29 км характеризуется большей степенью закрытия. СКО инструментальной погрешности измерения разности фаз составляло 2°. Исходными данными для исследования являлись совместные измерения разности фаз $\varphi_{\text{в}}$ и $\varphi_{\text{г}}$, и амплитуд $U_{\text{в}}$ и $U_{\text{г}}$ в приемных каналах с вертикальной и горизонтальной поляризацией соответственно. Измерения проводились отдельно по каждому принятому импульсу через 100 нс после его обнаружения по превышению порогового уровня.

Методика эмпирической оценки зависимости отношения дисперсий разности фаз в каналах приема ортогонально поляризованных сигналов от поляризационного отношения заключалась в следующем.

1. Для каждого отсчета разности фаз рассчитывалось соответствующее значение логарифма отношения сигнал/шум: $q^2 = U^2 / 2\sigma_{\text{ш}}^2$.

2. Отсчеты разности фаз $\varphi_{\text{в}}$ и $\varphi_{\text{г}}$ группировались по величине соответствующего значения отношения сигнал/шум q с шагом 2 дБ и оценивались дисперсии разности фаз $\sigma_{\text{в}}(q_{\text{в}})$ и $\sigma_{\text{г}}(q_{\text{г}})$. Данные, соответствующие $q \leq 0$ дБ, отбрасывались.

3. Полученные эмпирические зависимости $\sigma_{\varphi}(q)$ аппроксимировались кривой вида

$$\sigma_{\varphi}(q) = kq^{-\nu}. \quad (8)$$

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости СКО разности фаз σ_{φ} от отношения сигнал/шум q , полученные на указанных выше трассах на фазометрической

базе $l = 18$ см. Зависимости построены в логарифмическом масштабе, линеаризирующем аппроксимирующую функцию (8).

Для оценки работоспособности аппаратуры на входы приемных каналов вертикальной и горизонтальной поляризации подавались сигналы от калибровочного генератора и оценивалась СКО выходной разности фаз, при этом зависимость $\sigma_{\varphi}^2 = 1/q^2$ соблюдалась при $q \leq 30$ дБ. При большем отношении сигнал/шум сказывались иные (не связанные с наличием шума) причины фазовых погрешностей. С учетом ограничений на q , налагаемых на справедливость формул (5), кривые на рис. 1 анализировались при $1 \text{ дБ} < q \leq 30 \text{ дБ}$.

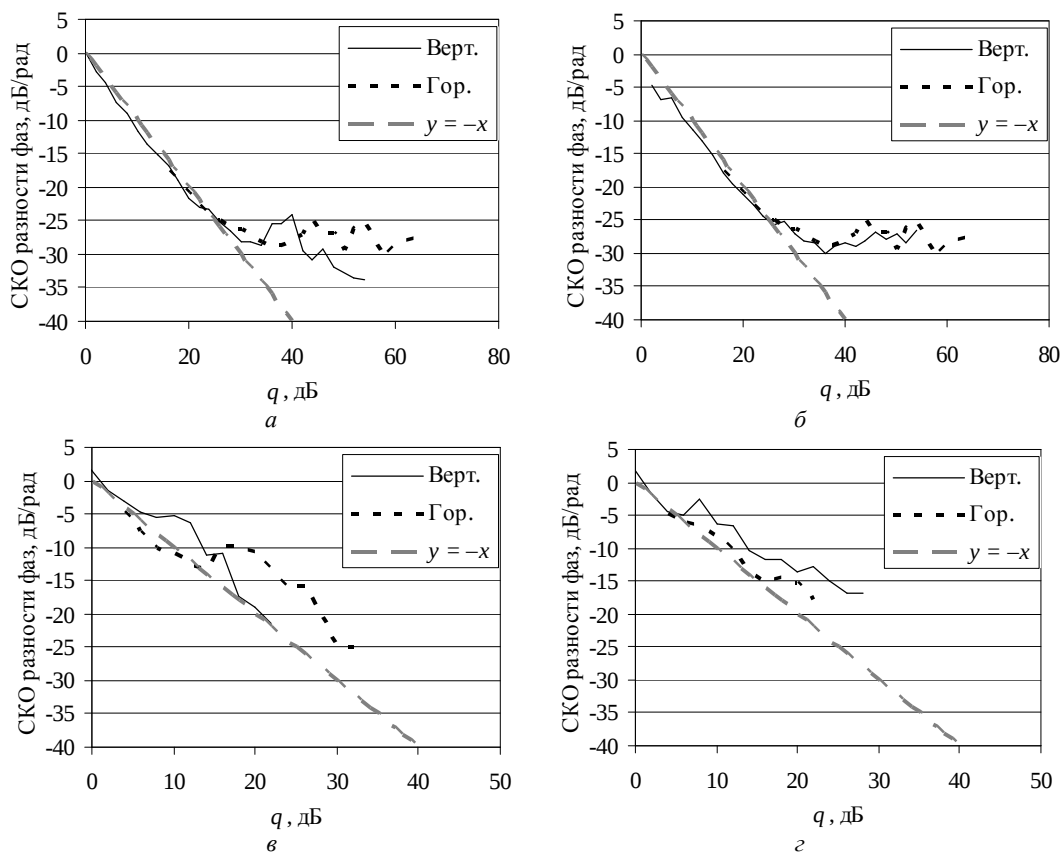


Рис. 1. Зависимость σ_{φ} СКО разности фаз от отношения сигнал/шум на трассе 17 км – горизонтальная поляризация излучения (а) и вертикальная поляризация излучения (б), на трассе 29 км – горизонтальная поляризация излучения (в) и вертикальная поляризация излучения (з)

Из рисунков видно, что на трассе 16,4 км полученные зависимости близки к линии $y = -x$, описывающей поведение СКО разности фаз при аддитивном гауссовом шуме, а на трассе 29 км в основном лежат выше ее. Из рисунков также видно, что влияние трассы 29 км на СКО разности фаз проявляется уже при отношении сигнал/шум 5–7 дБ, в то время как на трассе 16,4 км – только при 25 дБ. Это объясняется большим на 40–50 дБ ослаблением сигнала на трассе 29 км. В связи с этим на этой трассе в обработку попали все импульсы, излученные за полный оборот диаграммы направленности источника излучения, а на трассе 16,4 км – только импульсы, соответствующие большим боковым лепесткам данной диаграммы. Это позволяет предположить, что доля задержанных менее чем на 100 нс рассеянных сигналов начинает существенно превышать шум приемников только в области максимума излучения и ближайших боковых лепестков.

В табл. 1 приведены параметры функции (8), аппроксимирующей эти зависимости.

Анализ полученных зависимостей показывает, что на различных трассах и при различных вариантах поляризации излучения и приема коэффициент ν изменяется от 0,98 до 0,67, при этом коэффициент k по абсолютной величине не превышает 3,1 дБ. Таким образом, на данных трассах с ростом отношения сигнал/шум дисперсия разности фаз уменьшается медленнее, чем при наличии только аддитивного нормального шума. Наиболее сильно этот эффект проявляется на трассах большой протяженности при согласованной с излучением поляризации приема. В среднем же зависимости ведут себя примерно одинаково для обеих поляризаций приема.

Таблица 1

Параметры аппроксимации зависимости $\sigma_\varphi(q)$ формулой (8)

Длина трассы, км	Поляризация излучения	Вертикальная поляризация приема		Горизонтальная поляризация приема	
		ν	$20lgk$	ν	$20lgk$
Лабораторные условия	–	0,98	–0,6	1,01	0,0
16,4	Гор.	0,93	–1,5	0,92	–1,7
	Верт.	0,85	–3,1	0,86	–2,8
29	Гор.	0,98	2,0	0,67	–1,1
	Верт.	0,67	0,6	0,85	0,1
Среднее по трассам 16,4 и 29 км		0,85	–0,5	0,82	–1,3

Учитывая полученные экспериментальные данные, выражение (7) можно записать следующим образом:

$$\varphi = \frac{\varphi_B}{1 + \rho^{-2\nu}} + \frac{\varphi_T}{1 + \rho^{2\nu}}. \quad (9)$$

Выражение (9) является обобщенным описанием алгоритма взвешивания измерений разности фаз в ортогонально поляризованных каналах пеленгатора. Значение $\nu = 0$ соответствует алгоритму усреднения равнооточных измерений, а значение $\nu = \infty$ соответствует алгоритму поляризационной обработки, при котором в качестве оценки выбирается значение разности фаз в наибольшем по уровню поляризационном канале пеленгатора [4]. Значение $\nu = 1$ соответствует алгоритму (7), разработанному для каналов с АГШ. Для реальных трасс требуется выбирать значение $\nu \in [0,5; 1]$. Оптимальное значение ν определяется величиной доли рассеянных сигналов в суммарном сигнале и отношением сигнал/шум в приемных каналах.

Для оценки величины возможного выигрыша от совместной поляризационной обработки на основе экспериментальных данных был произведен расчет дисперсии оценки разности фаз (9) при значениях параметра $\nu = 0,83; 1; \infty$. Экспериментальные данные были получены на тех же трассах, но по большему объему реализаций и на двух фазометрических базах – 18 и 90 см. По результатам расчетов был оценен относительный выигрыш поляризационной обработки относительно приема только вертикальной ($\varphi = \varphi_B$) или только горизонтальной ($\varphi = \varphi_T$) поляризации излучения. Результаты приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Средний выигрыш при поляризационной обработке на базе 90 см

Длина трассы, км	Выигрыш по СКО относительно $\varphi = \varphi_B$, дБ			Выигрыш по СКО относительно $\varphi = \varphi_T$, дБ		
	$\nu = 0,83$	$\nu = 1$	$\nu = \infty$	$\nu = 0,83$	$\nu = 1$	$\nu = \infty$
16,4	4,4	4,4	3,2	4,2	4,2	3,0
29	4,1	4,2	3,2	1,3	1,3	0,3

Таблица 3

Средний выигрыш при поляризационной обработке на базе 18 см

Длина трассы, км	Выигрыш по СКО относительно $\varphi = \varphi_B$, дБ			Выигрыш по СКО относительно $\varphi = \varphi_T$, дБ		
	$\nu = 0,83$	$\nu = 1$	$\nu = \infty$	$\nu = 0,83$	$\nu = 1$	$\nu = \infty$
16,4	6,1	6,1	5,0	3,8	3,8	2,7
29	4,9	5,0	3,8	1,8	1,9	0,6

Как видно из таблиц, применение поляризационной обработки измерений разности фаз с использованием выражения (9) позволяет получить выигрыш по отношению к приему только одной поляризации от 1 до 6 дБ. Выигрыш несколько уменьшается при увеличении базы пеленгатора, а также при увеличении длины трассы и степени ее закрытости. Выигрыш при поляризационной обработке по отношению к приему на горизонтальной поляризации существенно меньше, чем по отношению к приему на вертикальной. Наибольший выигрыш наблюдается при значении $\nu \approx 1$. Разница между $\nu = 0,83$ и $\nu = 1$ находится в пределах статистической погрешности. Таким образом, алгоритм (7) может с успехом применяться на реальных трассах.

Выводы

1. Разработан алгоритм расчета средневзвешенных оценок разности фаз на основе поляризационного отношения принимаемых сигналов в пеленгаторе с каналами раздельного приема сигналов вертикальной и горизонтальной поляризации при воздействии аддитивного гауссовского шума.

2. Экспериментально исследованы зависимости дисперсии разности фаз от отношения сигнал/шум в каналах пеленгатора на двух наземных трассах. Определено, что зависимость дисперсии разности фаз на исследуемых трассах близка к зависимости в каналах с АГШ и в среднем подчиняется закону $\sigma_\varphi(q) = q^{-0,83}$ при $1 \text{ дБ} < q \leq 30 \text{ дБ}$.

3. Экспериментально оценен выигрыш по СКО оценки разности фаз от использования в пеленгаторе отдельных каналов приема ортогонально поляризованных сигналов и взвешивающего алгоритма суммирования парциальных оценок, который составил от 0,3 до 6,1 дБ при различных ν относительно приема на линейной поляризации. Показано, что в отношении полученного выигрыша аппроксимация $\sigma_\varphi(q) = q^{-1}$ не проигрывает аппроксимации вида $\sigma_\varphi(q) = kq^{-\nu}$ при усредненных для использованных трасс коэффициентах ν и k .

Литература

1. Крутиков М.В. Оптимизация совместной обработки ортогонально поляризованных сигналов в пеленгаторах источников излучения с направленной сканирующей антенной / М.В. Крутиков, В.П. Денисов, М.П. Скородумов // XV Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, радионавигация, связь». – Воронеж, 2009. – Т. 3. – С. 1674–1680.

2. Денисов В.П. Исследование антенной системы фазового пеленгатора на наземных трассах / В.П. Денисов, Н.А. Колядин // Доклады ТУСУРа. – 2009. Т. 1 (19), ч. 1. – С. 7–14.

3. Цветнов В.В. Воздействие гауссовых помех на двухканальные фазовые системы // Исследование точности и помехоустойчивости фазовых пеленгаторов. – Л.: Судпромгиз, 1959. – С. 26–68.

4. Поляризационные методы обработки радиосигналов / А.П. Родимов, В.В. Поповский, В.И. Дмитриев, В.В. Никитченко // Зарубежная радиоэлектроника. – 1981. – № 4. – С. 38–47.

Денисов Вадим Прокопьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. радиотехнических систем
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники
Тел.: (3822) 41-38-69
Эл. почта: dvp@ms.tusur.ru

Крутиков Михаил Владимирович

Заведующий лабораторией НИИ радиотехнических систем
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники
Тел.: (3822) 41-38-69
Эл. почта: rwplab@ms.tusur.ru

Лебедев Виталий Юрьевич

Канд. техн. наук, ст. научный сотрудник НИИ радиотехнических систем
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники
Тел.: (3822) 41-38-89
Эл. почта: levi@ms.tusur.ru

Скородумов Михаил Павлович

Начальник НИО ФГУП, «НИИ Вектор» (г. Санкт-Петербург), главный специалист 1-й кат.
Тел.: (8812) 295-23-93
Эл. почта: vektorn2@nii-vektor.ru

V.P. Denisov, M.V. Krutikov, V.Y. Lebedev, M.P. Skorodumov

The cooperative processing of orthogonal polarization waves in phase direction finders of radio monitoring systems

The paper describes the most probable method of bearing by phase direction finders, which use separation reception of signals past terrestrial paths. The basis for analysis are experimental data of investigations of propagation X-diapason radio waves where the pulse radiate source was used with narrow scanned direct antenna.

Keywords: bearing, polarization, phase difference dispersion, terrestrial path, experimental study.