

УДК: 004.056.53

**МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ
ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ДИНАМИКЕ РАДИОКОНТРОЛЯ**

**A MODEL FOR ESTIMATING THE ERROR IN DETERMINING THE LOCATION
OF A RADIO SOURCE IN THE DYNAMICS OF RADIO MONITORING**

*Канд. техн. наук П.И. Кузин, канд. техн. наук А.П. Бойко,
канд. техн. наук А.А. Бирюков, канд. техн. наук А.В. Давыдов*

Ph.D. A.P. Boyko, Ph.D. A.V. Davydov, Ph.D. P.I. Kuzin, Ph.D. A.A. Birykov

ВАС им. С.М. Буденного

В статье предложена модель оценки погрешности определения местоположения источника радиоизлучения, как объекта радиоконтроля в УКВ диапазоне. Предоставляется возможность оценить точность нахождения объекта связи от глубины замираний принимаемого сигнала по обобщённому закону Накагами и взаимного расположения контролируемых объектов постом контроля безопасности связи при воздействии на него посторонних источников радиоизлучения. Модель позволяет судить об увеличении точности определения местоположения объектов контроля от угловой ошибки пеленгования, что существенно повышает своевременность радиоконтроля и достоверность принимаемой информации от источников радиоизлучения в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки.

Ключевые слова: радиоконтроль, местоположение источника радиоизлучения, угловая ошибка пеленгования, замирания, m -распределение, УКВ диапазон.

The article proposes a model for estimating the error in determining the location of a radio source as an object of radio monitoring in the VHF range. It is possible to evaluate the accuracy of finding the communication object from the depth of fading of the received signal according to the generalized Nakagami law and the relative location of the monitored objects by the communication security control post when exposed to extraneous radio sources. The model allows us to judge an increase in the accuracy of determining the location of monitoring objects from the angular bearing error, which significantly increases the timeliness of radio monitoring and the reliability of received information from radio sources in a complex signal-interference environment.

Keywords: radio monitoring, radio source locations, angular bearing error, fading, m -distribution, VHF range.

С целью повышения своевременности радиоконтроля и достоверности приема информации в системах радиосвязи УКВ диапазона, по оценкам качества приема и в зависимости от помеховой обстановки, в каналах связи могут перестраиваться следующие параметры: несущая частота радиостанции, мощность излучения, скорость передачи информационных

символов, а также вид модуляции, способ кодирования и другие. Погрешность результатов измерения является важной характеристикой измерения, она вычисляется или оценивается и приписывается полученному результату. Работа поста радиоконтроля в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки (ССПО) оказывает влияние на результат измерения тех-

нических параметров контролируемых источников радиоизлучения (ИРИ). В работе [1, 2] наиболее точно рассматривается определение угловой ошибки пеленгования. Так как абсолютное значение ошибки пеленга зависит от случайной величины $z = 10 \lg \frac{P_c}{P_n} = 10 \lg A$, то представляется возможным говорить об устойчивости реализации требуемой точности пеленгования. Вероятность достижения устойчивости реализации требуемой точности пеленгования оценивается [3, 4]:

$$P(\Delta_p^\circ \leq \Delta_{\text{ск}}^\circ) = P(z \geq z_{\text{тр}}) = \Phi\left(\frac{\bar{z} - z_{\text{тр}}}{\sigma_z}\right), \quad (1)$$

где $z_{\text{тр}} = 10 + 10 \lg \frac{\sin(\theta_n^\circ - \theta_c^\circ) - \cos(\theta_n^\circ - \theta_c^\circ) \text{tg} \Delta_{\text{ск}}^\circ}{\text{tg} \Delta_{\text{ск}}^\circ} + \xi \sigma_z$, θ_c° — истинное направление на пеленгуемый ИРИ; θ_n° — направление на мешающее радиоизлучение; $z_{\text{тр}}$ — необходимое превышение сигнала над помехой; \bar{z} — среднее отклонение значений мощности сигнала к мощности помехи на входе приемного устройства; σ_z — среднеквадратичное отклонение величины z .

Для уменьшения ошибки пеленга необходимо многократное измерение пеленга. Если предположить, что отчеты пеленга независимы, то дисперсия при статистической обработке результатов снятия пеленга определяется по формуле [5]:

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_{\theta_i}^2}{k}. \quad (2)$$

Если дисперсия ошибок одинакова, то $\Delta_{\text{ск}}^\circ = \sigma_{\theta_i} \sqrt{k}$, где σ_{θ_i} — среднеквадратичное отклонение пеленга при единичном его измерении; k — количество отчетов пеленга.

При условии распределения ошибки измерения пеленга по нормальному закону среднее значение реализуемой ошибки пеленга $\Delta_p^\circ = 0,8\sigma_\theta$. Используя это свойство нормального закона распределения, можно определить необходимое количество отчетов пеленга для реализации требуемой точности пеленгования $k = 1,6 \left(\frac{\Delta_p^\circ}{\Delta_{\text{ск}}^\circ} \right)^2$.

Время снятия одного пеленга можно принять 2 с. Угловая ошибка пеленгования при исполь-

зовании многоканальных и одноканальных приемоиндикаторов в условиях воздействия сосредоточенных по спектру помех определяется для каналов с постоянными параметрами при разности фаз высокочастотных колебаний сигнала и помехи $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$ [5, 6].

При $\varphi = 0^\circ$ угловая ошибка пеленгования ИРИ может быть определена:

$$\Delta = \text{arctg} \frac{A \sin(\theta_c^\circ - \theta_n^\circ)}{1 + A \cos(\theta_c^\circ - \theta_n^\circ)}.$$

При $\varphi = 180^\circ$ угловая ошибка пеленгования ИРИ может быть определена:

$$\Delta = \text{arctg} \frac{-A \sin(\theta_c^\circ - \theta_n^\circ)}{1 - A \cos(\theta_c^\circ - \theta_n^\circ)}.$$

Распределение ошибки пеленга, как функция от A , подчиняется логарифмически-нормальному закону распределения, а средняя угловая ошибка отсчета пеленга определяется из выражения [7]:

$$\bar{\Delta} = 2 \int_0^{2\pi} \Delta(A) W[\Delta(A)] d\Delta(A),$$

где $W[\Delta(A)]$ — плотность распределения вероятностей величины $\Delta(A)$.

В условиях ССПО функция плотности вероятности, огибающей сигнала, описывающая быстрые замирания. Меняется в зависимости от условий распространения, меняется не только вид функции от Релея до Райса, но и числовые значения моментов распределения. В этом случае, для описания плотности вероятности быстрых флуктуаций сигналов целесообразно использовать m -распределение Накагами [8, 9], с параметрами распределения m и Ω :

$$W(z) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega} \right)^m z^{2m-1} \exp\left(-\frac{z^2}{\Omega}\right),$$

где $\Gamma(m)$ — гамма функция; m и Ω — параметры распределения.

При распределении величины $z = 10 \lg \frac{P_c}{P_n} = 10 \lg A$, с учетом замираний по закону распределения Накагами, получим:

$$\bar{\Delta} = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \left[\arctg \frac{10^{\frac{z}{10}} \sin(\theta_c^\circ - \theta_n^\circ)}{1 + 10^{-\frac{z}{10}} \cos(\theta_c^\circ - \theta_n^\circ)} \right] \times \\ \times \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega} \right)^m z^{2m-1} \exp\left(-\frac{z^2}{\Omega}\right) dz.$$

Результаты анализа данных пеленгования показали зависимость средней угловой ошибки пеленгования от среднего соотношения мощностей сигнала и помехи при различных значениях $\theta_c^\circ - \theta_n^\circ$ и m (рис. 1–3).

Из рис. 1–3 видно, что с увеличением разности углов прихода сигнала и помехи резко возрастает $\bar{\Delta}^\circ$. Существенные значения угловых ошибок наблюдается при $\theta_c^\circ - \theta_n^\circ \geq 30^\circ$.

Получены зависимости среднего значения погрешности измерения пеленга от параметра распределения m (рис. 4, 5).

Из рис. 4, 5 видно, что среднее значение погрешности измерения пеленга $\bar{\Delta}^\circ$, зависит от глубины замираний в канале связи (значение параметра распределения m). Чем глубже замирания в канале связи, тем выше погрешность измерения пеленга.

При пеленговании ИРИ сетью из $N_{\text{пел.}}$ количества пеленгаторов вероятность определения местоположения радиостанции можно определить: [10]:

$$P_{\text{опр.}}(\Delta_{\text{ск}}^\circ \leq \Delta_{\text{ск.доп}}^\circ) = \sum_{k > k_{\text{дон}}}^{N_{\text{пел.}}} C_{N_{\text{пел.}}}^k P_{\text{пр.1}}^k (1 - P_{\text{пр.1}})^{N_{\text{пел.}} - k},$$

где k — минимальное количество правильно выполненных пеленгов, необходимых для получения засечки; $P_{\text{пр.1}}$ — вероятность снятия пеленга на объект радиоконтроля при однократном выходе его в эфир, $\Delta_{\text{ск.доп}}^\circ$ — допустимое отклонение точности пеленга.

Таким образом, в рамках задачи обеспечения своевременности радиоконтроля разработана модель оценки погрешности определения местоположения ИРИ в динамике радиоконтроля. Она позволяет повысить точность пеленгования ИРИ с учетом полученных зависимостей погрешности пеленга от глубины замираний и взаимного расположения контролируемого ИРИ, и посторонних ИРИ. В условиях ССПО существенно затрудняется определение местоположения объ-

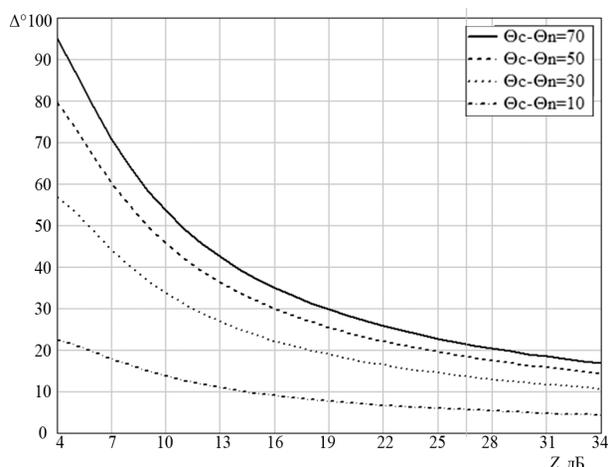


Рис. 1. Зависимость средней угловой ошибки пеленгования от среднего соотношения мощностей сигнала и помехи при параметре распределения $m=0,5$

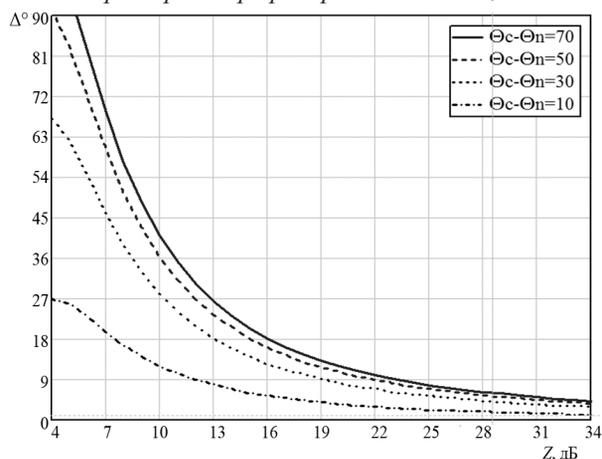


Рис. 2. Зависимость средней угловой ошибки пеленгования от среднего соотношения мощностей сигнала и помехи при параметре распределения $m=1$

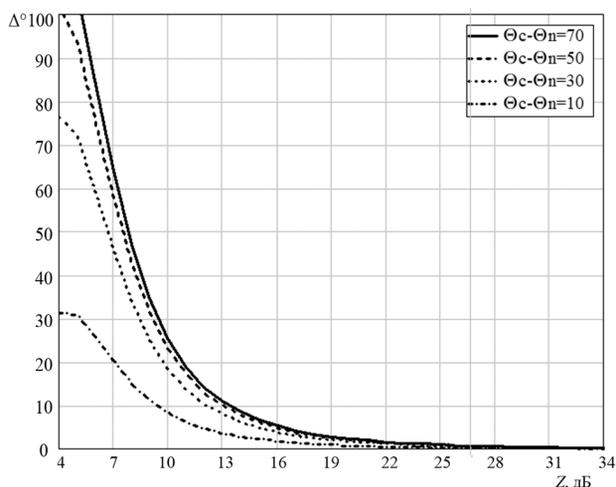


Рис. 3. Зависимость средней угловой ошибки пеленгования от среднего соотношения мощностей сигнала и помехи при параметре распределения $m=2$

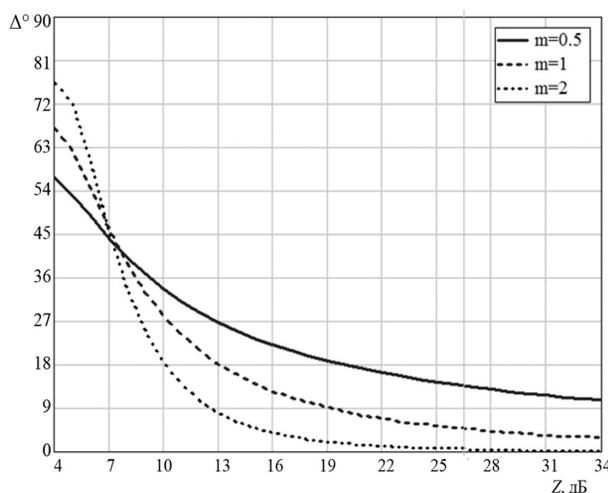


Рис. 4. Зависимость погрешности измерения пеленга от параметра распределения m при $(\theta_c^\circ - \theta_n^\circ = 30^\circ)$

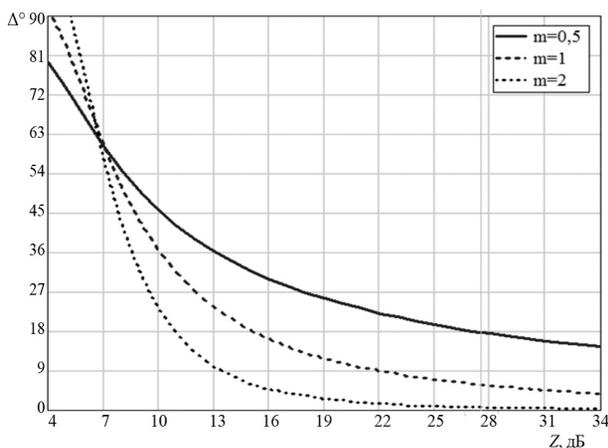


Рис. 5. Зависимость погрешности измерения пеленга от параметра распределения m при $(\theta_c^\circ - \theta_n^\circ = 50^\circ)$

екта радиоконтроля в УКВ диапазоне. Установлено, что на точность пеленгования оказывает влияние большое количество факторов, причем в каналах с переменными параметрами средняя угловая ошибка превышает угловую ошибку в каналах с постоянными параметрами, достигая величин десятков градусов.

Литература

1. Кузин П.И., Панкин А.А. и др. Выявление несанкционированных воздействий в сетях спутниковой связи. Телекоммуникации. 2015. Вып. 10. С. 18–21.
2. Кузин П.И., Липатников В.А. Метод повышения оперативности смены параметров адаптации, при приеме информации в системах радио-

связи КВ–УКВ диапазонов // Научный журнал «Автоматизация процессов управления». 2016. № 4 (46). С. 18–22.

3. Липтников В.А., Кузин П.И. Способ адаптивного измерения параметров источников радиоизлучения в ОВЧ–КВЧ диапазоне. Метрология в радиоэлектронике. Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений». 2016. 146 с.

4. Соломатин А.И., Терентьев А.В. и др. Радиопеленгация. Теория и практика. — СПб: ВАС. 2006. 356 с.

5. Кузин П.И., Липатников В.А. Способ проактивного управления параметрами комплекса контроля безопасности связи // Сб. материалов VII МНТК «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», 2018 г. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. 728 с.

6. Рабин А.В. и др. Передачи сигналов в каналах связи с замираниями Накагами // Успехи современной радиоэлектроники. — М.: «Издательство Радиотехника». 2019. № 11. С. 71–78.

7. Kuzin P.I. et al. Signal protection methods in channels with Nakagami fading // «International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies» (ICMSIT-2020). — Krasnoyarsk: Journal of Physics: Conference Series.

8. Lipatnikov V.A., Kuzin P.I. Method of adaptive measurement of parameters of radio emission sources in the microwave range. Metrology in radio electronics. Abstracts of scientific and technical conference reports. FSUE «All-Russian research Institute of physical-technical and radio-technical measurements». 2016. P. 146–156.

9. Рабин А.В. и др. Метод повышения надежности помехозащищенности при приеме информации в системах радиосвязи СВЧ- и КВЧ-диапазонов. Радиотехника. 2020. Т. 84. № 8 (16). С. 5–12.

10. Кузин П.И., Липатников В.А. Автоматизация радиотехнических измерений параметров радиоканалов системы спутниковой связи в УВЧ–СВЧ-диапазонах // Сборник материалов ВНТК ФГУП «ВНИИФТРИ». — Санкт-Петербург. 2018. 302 с.

References

1. Kuzin P.I., Pankin A.A. et al. Detection of unauthorized impacts in satellite communication networks. *Telecommunications*. 2015. Issue 10. P. 18–21.
2. Kuzin P.I., Lipatnikov V.A. A method for increasing the efficiency of changing adaptation parameters when receiving information in HF – VHF radio communication systems // *Scientific Journal «Automation of management processes»*. 2016. № 4 (46). P. 18–22.
3. Liptnikov V.A., Kuzin P.I. Method of adaptive measurement of parameters of radio sources in the VHF-EHF range. *Metrology in radio electronics. Abstracts of the All-Russian Scientific and Technical Conference. FSUE «All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radio-technical Measurements»*. 2016. 146 p.
4. Solomatin A.I., Terentyev A.V. et al. Radio direction finding. Theory and practice. — St. Petersburg: VAS. 2006. 356 p.
5. Kuzin P.I., Lipatnikov V.A. The method of proactive control of parameters of the communication security control complex // *Collection of materials of the ISTC «Actual problems of infotelecommunications in science and education»*. 2018. St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruевич. 728 p.
6. Rabin A.V. et al. Signal transmissions in communication channels with Nakagami fades // *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. — M.: «Publishing House Radiotekhnika». 2019. № 11. P. 71–78.
7. Kuzin P.I. et al. Signal protection methods in channels with Nakagami fading // «International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies» (ICMSIT-2020). — Krasnoyarsk: *Journal of Physics: Conference Series*.
8. Lipatnikov V.A., Kuzin P.I. Method of adaptive measurement of parameters of radio emission sources in the microwave range. *Metrology in radio electronics. Abstracts of scientific and technical conference reports. FSUE «All-Russian research Institute of physical-technical and radio-technical measurements»*. 2016. P. 146–156.
9. Rabin A.V. et al. Method for improving the reliability of noise immunity when receiving information in radio communication systems of the microwave and EHF bands *Radio engineering*. 2020. Vol. 84. № 8 (16). P. 5–12.
10. Kuzin P.I., Lipatnikov V.A. Automation of radio engineering measurements of parameters of radio channels of the satellite communication system in the UHF-MICROWAVE bands // *Collection of materials of VNTK FSUE «VNIIFTRI»*. — Saint-Petersburg, 2018. 302 p.