

Калинин Т.В., Рябчиков С.А., Сибилев Р.В. Подход к разработке методики...

5. *Perminov A.N., Prokhorovich V.B., Ptushkin A.I.* Ot monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya raketno-kosmicheskoy tekhniki k monitoringu ee zhiznennogo tsikla // V mire nerazrushayushchego kontrolya. 2004. № 4 (26). S. 8–11.

6. *Petukhov G.B., Yakunin V.I.* Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya tselenapravlennykh protsessov i tselestremlynykh sistem. M.: AST, 2006. 502 s.

7. *Saati T., Kerne K.* Analiticheskoe planirovanie. M.: Radio i svyaz', 1991.

DOI: 10.25586/RNUV9187.20.01.P079

УДК 621.396.96

Т.В. Калинин, С.А. Рябчиков, Р.В. Сибилев

ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЯ  
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ

Предлагается подход к разработке методики оценки показателя помехоустойчивости радиолокационной станции в условиях помех, который характеризует уменьшение дальности обнаружения целей, находящихся в секторе ответственности станции, и изменение ее зоны обзора.

*Ключевые слова:* помехоустойчивость радиолокационной станции, показатель помехоустойчивости радиолокационной станции, оценка помехоустойчивости радиолокационной станции, активная шумовая помеха, зона обзора.

T.V. Kalinin, S.A. Ryabchikov, R.V. Sibilev

APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF METHODS  
FOR ASSESSING THE NOISE IMMUNITY OF RADAR STATIONS  
UNDER THE INFLUENCE OF ACTIVE NOISE INTERFERENCE

An approach is proposed to develop a methodology for assessing the noise immunity index of a radar station under interference conditions, which characterizes a decrease in the detection range of targets in the station's responsibility sector and a change in its field of view.

*Keyword:* interference immunity of the radar station, increased noise immunity of the radar station, estimation of noise immunity of the radar station, active noise interference, field of view.

*Введение*

В настоящее время работа любого радиоэлектронного средства (РЭС), в том числе и радиолокационной станции (РАС), ведется в сложной радиоэлектронной обстановке – в условиях воздействия естественных и искусственных помех. Помехи могут не только ухудшить рабочие характеристики РАС, но и полностью нарушить ее работу.

Для однозначного понимания существа излагаемого материала будем пользоваться общепринятой в отечественной технической литературе терминологией и классификацией, в соответствии с которыми помехозащищенность РАС характеризуется скрытностью и помехоустойчивостью. Под скрытностью понимается способность РАС противостоять мерам, направленным на обнаружение ее сигнала и определение его параметров. Под по-

мехоустойчивостью понимается способность РЛС работать с требуемым качеством при воздействии на нее помех [1; 2].

Учитывая многоплановость и сложность проблемы повышения помехозащищенности РЛС, остановимся лишь на оценке их мехоустойчивости от активных преднамеренных (организованных) помех. Для того чтобы охарактеризовать мехоустойчивость РЛС, используют различные показатели [4; 5]. С целью количественной оценки мехоустойчивости используют основные, обобщенные, а также частные показатели. К основным показателям относят вероятности выполнения задач  $P_{ВЗ}^{ПП}$  и  $P_{ВЗ}^{НП}$  соответственно в условиях и при отсутствии преднамеренных помех, зависящие от назначения РЭС. К частным показателям относятся коэффициент подавления помех и величина снижения основных характеристик РЛС [3; 4] вследствие воздействия помех. В качестве обобщенных используются показатели, оцениваемые различного рода математическими выражениями, учитывающими множество технических параметров РЛС [4], а также платежная матрица [5], составленная с использованием методов теории игр.

В качестве одного из частных показателей, характеризующих изменение зоны обзора (ЗО) в помехах, может быть использован коэффициент сжатия ЗО  $K_{ск}$ .

*Подход к разработке методики оценки показателя мехоустойчивости РЛС при воздействии активных шумовых помех*

Коэффициент сжатия  $K_{ск}$  ЗО РЛС характеризует степень сохранения дальности обнаружения целей в условиях воздействия на РЛС активных шумовых помех (АШП):

$$K_{ск} = D_n(\epsilon) / D_0(\epsilon), \quad (1)$$

где  $D_n(\epsilon)$  – дальность обнаружения станцией целей в условиях воздействия АШП на фиксированной высоте ( $\epsilon = \text{const}$ );  $D_0(\epsilon)$  – дальность обнаружения станцией воздушных объектов при отсутствии помех.

Дальность обнаружения целей при работе без помех и при фиксированных параметрах передающего и антенно-фидерного устройства РЛС зависит от мощности собственных шумов приемного устройства  $P_{ш}$ :

$$D_0(\epsilon) = \sqrt[4]{\frac{P_n G_{пер} F_{пер}(\epsilon) G_{пр} F_{пр}(\epsilon) \lambda^2 \sigma_c L}{(4\pi)^3 q P_{ш}}} = K \sqrt[4]{\frac{1}{P_{ш}}}, \quad (2)$$

где

$$K = \sqrt[4]{\frac{P_n G_{пер} F_{пер}(\epsilon) G_{пр} F_{пр}(\epsilon) \lambda^2 \sigma_c L}{(4\pi)^3 q}}; \quad (3)$$

$P_n$  – импульсная мощность зондирующего сигнала РЛС;  $G_{пер}$ ,  $G_{пр}$  – коэффициенты усиления антенны на передачу и прием;  $F_{пер}(\epsilon)$ ,  $F_{пр}(\epsilon)$  – значения нормированных диаграмм направленности передающей и приемной антенн в направлении на цель (под углом места  $\epsilon$ );  $\lambda$  – длина волны;  $L$  – коэффициент потерь энергии в передающем и приемном трактах;  $q$  – коэффициент различимости, зависящий от вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог;  $P_{ш}$  – мощность собственных шумов приемника, пересчитанная к его входу.

Воздействие внешних активных шумовых помех на дальность обнаружения целей по своему эффекту эквивалентно возрастанию уровня шумов приемника на

Калинин Т.В., Рябчиков С.А., Сибилев Р.В. Подход к разработке методики...

выходе устройства защиты от АШП. Это позволяет выразить  $D_n(\epsilon)$  из (1) в следующем виде:

$$D_n(\epsilon) = K \sqrt[4]{\frac{1}{P_{ш} + P_{н\Sigma}}}, \quad (4)$$

где  $P_{н\Sigma}$  – мощность помехи на выходе устройства защиты от АШП.

Тогда с учетом (3)–(4) коэффициент сжатия ЗО (1) может быть представлен в следующем виде:

$$K_{сж} = \sqrt[4]{\frac{P_{ш}}{P_{ш} + P_{н\Sigma}}} = \sqrt[4]{1 + P_{н\Sigma} / P_{ш}}. \quad (5)$$

Таким образом, из (5) видно, что для расчета  $K_{сж}$  необходимо определить отношение

$$P_{н\Sigma} / P_{ш}. \quad (6)$$

Отношение (6) определяется из уравнения радиолокации и противорадиолокации.

Мощность одного постановщика помех определяется из выражения

$$P_n = \frac{P_n G_n F_n(\Delta\beta, \Delta\epsilon)}{\Delta f_n} S_{эф} \Delta f_{пр} \kappa_{шп} \kappa_{нп} L_{пр} \eta_N,$$

где  $S_{эф} = \frac{G_{пр} F_{пр}(\Delta\beta, \Delta\epsilon) \lambda^2}{4\pi}$  – эффективная площадь антенны РЛС в направлении на постановщика активных помех (ПАП).

Для  $N$  ПАП суммарная мощность помехи на выходе устройства защиты  $P_{н\Sigma}$  определяется следующим выражением:

$$P_{н\Sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{(4\pi R_{ni})^2} \frac{P_{ni} G_{ni}}{\Delta f_{ni}} F_n(\Delta\beta_i, \Delta\epsilon_i) G_{пр} F_{пр}(\Delta\beta_i, \Delta\epsilon_i) \lambda^2 \Delta f_{пр} \kappa_{шп} \kappa_{нп} L_{пр} \eta_N, \quad (7)$$

где  $N$  – количество ПАП, воздействующих на РЛС;  $i$  – порядковый номер ПАП;  $R_{ni}$  – дальность до  $i$ -го ПАП;  $P_{ni}$  – мощность помех на выходе  $i$ -го передатчика ПАП;  $G_{ni}$  – коэффициент усиления передающей антенны  $i$ -го ПАП;  $\Delta f_{ni}$  – ширина спектра  $i$ -й помехи;  $\Delta\beta_i, \Delta\epsilon_i$  – угол между направлением на цель и направлением на  $i$ -й ПАП в азимутальной или угломестной плоскости соответственно;  $F_n(\Delta\beta_i, \Delta\epsilon_i)$  – значение нормированной диаграммы направленности передающей антенны  $i$ -го ПАП в направлении РЛС;  $F_{пр}(\Delta\beta_i, \Delta\epsilon_i)$  – значение нормированной диаграммы направленности (ДН) приемной антенны РЛС в направлении на  $i$ -й ПАП;  $K_{шп}$  – коэффициент, учитывающий возможное ухудшение качества помехи за счет использования модуляции шумом (для прямошумовой помехи ( $K_{шп} = 1$ ));  $K_{нп}$  – коэффициент, учитывающий несовпадение поляризации помехи и поляризации, оптимальной для приемной антенны РЛС (принимает значение от 0 до 1, в расчетах обычно принимают  $K_{нп} = 0,5$ );  $L_{пр}$  – коэффициент потерь в приемном тракте РЛС;  $\eta_N$  – коэффициент подавления помех автокомпенсационной аппаратурой (АКА) РЛС при воздействии АШП.

Для практических расчетов можно принять:

$\eta_N = -K_n$  дБ, если число ПАП в секторе действия АКА не превышает числа каналов АКП ( $K_n = 15-25$  дБ);

$\eta_N = -2$  дБ, если число ПАП в секторе действия АКФ больше числа каналов АКП;

$\eta_N = 0$  дБ, если РЛС не имеет АКА.

Тогда из (6) с учетом (7)

$$\begin{aligned} \frac{P_{n\Sigma}}{P_{\text{ш}}} &= \frac{1}{kT_0 N_{\text{ш}} \Delta f_{\text{ш}}} \sum_{i=1}^N \frac{P_{\text{ш}} G_{\text{ш}}}{\Delta f_{\text{ш}}} \frac{F_{\text{ш}}(\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i)}{(4\pi R_{\text{ш}})^2} G_{\text{ш}} F_{\text{ш}}(\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i) \lambda^2 \Delta f_{\text{ш}} \kappa_{\text{ш}} \kappa_{\text{ш}} L_{\text{ш}} \eta_N = \\ &= \frac{G_{\text{ш}} \lambda^2 L_{\text{ш}}}{4\pi N_{\text{ш}}} \sum_{i=1}^N \frac{K_{\text{ш}} K_{\text{ш}}}{4\pi k T_0} \frac{\rho_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}^2} F_{\text{ш}}(\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i) F(\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i) \eta_N, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\rho_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ш}} G_{\text{ш}}}{\Delta f_{\text{ш}}}$  – спектральная плотность потока мощности помех в направлении максимума излучения антенны ПАП.

При принятых допущениях  $K_{\text{ш}} = 1$ ,  $K_{\text{ш}} = 0,5$  выражение под знаком суммы в формуле (8) приобретает вид

$$\begin{aligned} \frac{K_{\text{ш}} K_{\text{ш}} \rho_{\text{ш}}}{4\pi k T_{0\text{ш}} R_{\text{ш}}^2} F_{\text{ш}}(\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i) F(\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i) \eta_N = \\ = 10^7 \frac{\rho_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}^2} F_{\text{ш}}(\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i) F(\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i) \eta_N. \end{aligned} \quad (9)$$

Для упрощения можно принять значения нормированной ДН приемной антенны РЛС в вертикальной плоскости и передающей антенны ПАП в горизонтальной и вертикальной плоскостях равными единице, т.е.

$$F_{\text{ш}}(\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i) = F_{\text{ш}}(\Delta\varepsilon_i) F_{\text{ш}}(\Delta\beta_i) = F_{\text{ш}}(\Delta\beta_i); F_{\text{ш}}(\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i) = 1; F_{\text{ш}}(\Delta\varepsilon_i) = 1.$$

С учетом принятых допущений параметры правой части выражения (8) объединим в две группы: в первую (А) отнесем те из них, которые не зависят от условий налета (являются постоянными для конкретного радиолокационного средства), а во вторую ( $K_{\Sigma}$ ) – те, которые зависят от характеристик передатчика помех, направления на постановщика помех и дальности до него:

$$\frac{P_{n\Sigma}}{P_{\text{ш}}} = \frac{G_{\text{ш}} \lambda^2 L_{\text{ш}}}{4\pi N_{\text{ш}}} \sum_{i=1}^N 10^7 \frac{\rho_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}^2} F_{\text{ш}}(\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i) \eta_N = AK_{\Sigma}, \quad (10)$$

$$A = \frac{G_{\text{ш}} \lambda^2 L_{\text{ш}}}{4\pi N_{\text{ш}}}, \quad (11)$$

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N 10^7 \frac{\rho_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}^2} F_{\text{ш}}(\Delta\beta_i) \eta_N. \quad (12)$$

Тогда выражение для расчета  $K_{\text{сж}}$  в общем виде можно записать так:

$$K_{\text{сж}} = \sqrt[4]{\frac{1}{1 + AK_{\Sigma}}}. \quad (13)$$

В соответствии с (12) значение коэффициента  $K_{\Sigma}$  определяется суммой

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N K_i'' = \sum_{i=1}^N \Delta\mu_i K_i', \quad (14)$$

где  $K_i'' = \Delta\mu_i K_i'$ ;  $\Delta\mu_i = F(\Delta\beta_i) \eta_N$ ;  $K_i' = 10^7 \frac{\rho_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}^2}$ .

Для определения величины  $F_{\text{пр}}(\Delta\beta_i)$  предварительно строят аппроксимированную ДН РАС на прием. При этом на реальной ДН антенны выделяются три области:

- 0 –  $\Delta\beta_1$  – область главного лепестка ДН;
  - $\Delta\beta_1 - \Delta\beta_2$  – область ближних боковых лепестков ДН;
  - $\Delta\beta_i - \pi$  – область дальних боковых лепестков (фона).
- Область главного лепестка аппроксимируется кривой вида

$$F(\Delta\beta) = 10 \lg \left\{ \exp \left( -2,78 \frac{(\Delta\beta)^2}{\Theta_\beta^2} \right) \right\} \text{ при } \Delta\beta \leq \Delta\beta_1, \quad (15)$$

где  $\Delta\beta = |\beta - \beta_n|$ ;  $\beta$  – азимут цели;  $\beta_n$  – азимут ПАП;  $\Theta_\beta$  – ширина главного лепестка ДН антенны в горизонтальной плоскости по уровню половинной мощности.

Область ближних боковых лепестков аппроксимируется квадратичной зависимостью вида

$$F(\Delta\beta) = 10 \lg \left\{ 0,5 F_{16\lambda} \left( \frac{(\Delta\beta_1)^2}{(\Delta\beta)_\beta^2} \right) \right\} \text{ при } \Delta\beta_1 < \Delta\beta \leq \Delta\beta_2, \quad (16)$$

где  $F_{16\lambda}$  – уровень первого лепестка ДН антенны в горизонтальной плоскости.

Область дальних боковых лепестков представляется прямой, проведенной по уровню фона  $F_\phi$ :

$$F(\Delta\beta) = F_\phi \text{ при } \Delta\beta_2 < \Delta\beta \leq \pi. \quad (17)$$

Значения величин  $\Delta\beta_1, \Delta\beta_2$  находятся из формул

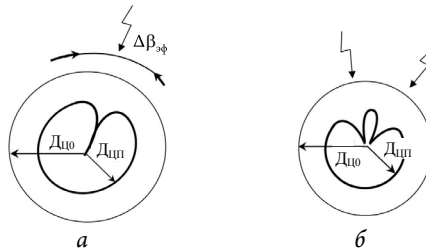
$$\Delta\beta_1 = \Theta_\beta \sqrt{0,25 - 0,09 F_{16\lambda}}, \quad (18)$$

$$\Delta\beta_2 = \Delta\beta_1 \sqrt{\frac{F_{16\lambda}}{2 F_\phi}}. \quad (19)$$

В результате появляется возможность определения дальности обнаружения целей в условиях воздействия на РАС АШП.

### Заключение

Таким образом, в предложенном подходе количественно изменение ЗО РАС при воздействии АШП характеризуется коэффициентом сжатия  $K_{\text{сж}}$  и шириной сектора эффективного подавления  $\Delta\beta_{\text{эф}}$  и позволит оценить помехоустойчивость станции. В графическом виде изменение ЗО РАС в условиях воздействия АШП на фиксированной высоте  $D_n(\epsilon)$ , приводящих к ухудшению основных тактических характеристик станции, представлено на рисунке.



Изменение ЗО РАС при воздействии постановщиков активных помех:

а – одного; б – двух

## Литература

1. Ботов М.И., Вяхирев В.А. Основы теории радиолокационных систем и комплексов: учебник / под общ. ред. М.И. Ботова. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 530 с.
2. Ворошилов В.А., Лянин И.С. Защита радиолокационных станций от преднамеренных помех // Зарубежная радиоэлектроника. 1990. № 5. С. 3–22.
3. Arkoumaneas E. Effectiveness of a Ground Jammer // IEE Proceedings F (Communications, Radar and Signal Processing). 1982. Vol. 129, № 3. P. 202–207.
4. Clarke J., Subramanian A.K. A Game Theory Approach to Radar ECCM Evaluation // Proceedings of the International Radar Conference. Arlington, 1985. P. 197–203.
5. Difranco J.V., Katteris C. Radar Performance Review in Clear and Jamming Environments // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1981. Vol. AES-17, № 5. P. 701–710.

## Literatura

1. Botov M.I., Vyakhirev V.A. Osnovy teorii radiolokatsionnykh sistem i kompleksov: uchebnyk / pod obshch. red. M.I. Botova. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2013. 530 s.
2. Voroshilov V.A., Lyanin I.S. Zashchita radiolokatsionnykh stantsij ot prednamerennykh pomekh // Zarubezhnaya radioelektronika. 1990. № 5. S. 3–22.
3. Arkoumaneas E. Effectiveness of a Ground Jammer // IEE Proceedings F (Communications, Radar and Signal Processing). 1982. Vol. 129, № 3. P. 202–207.
4. Clarke J., Subramanian A.K. A Game Theory Approach to Radar ECCM Evaluation // Proceedings of the International Radar Conference. Arlington, 1985. P. 197–203.
5. Difranco J.V., Katteris C. Radar Performance Review in Clear and Jamming Environments // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1981. Vol. AES-17, № 5. P. 701–710.

DOI: 10.25586/RNU.V9187.20.01.P.084

УДК 517.977

И.С. Клименко, А.А. Баскаков, Л.В. Шарпова

## К ПРОБЛЕМЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ В СИСТЕМАХ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Проведен анализ условий сохранения управляемости в системах с обратной связью на основе привлечения принципа необходимого разнообразия Эшби. Показано, что при выполнении процедур оперативного управления, обеспечивающего рутинное функционирование систем, задача сохранения управляемости сводится к выполнению условий изоморфизма множества его состояний и множества управляющих воздействий. При реализации иерархического управления, протекающего в условиях неполной определенности, возрастает вероятность возникновения положительной обратной связи, что может приводить к дальнейшему росту неопределенности и в конечном итоге к потере управляемости.

*Ключевые слова:* обратная связь, принцип необходимого разнообразия Эшби, энтропия, неопределенность сообщений.

I.S. Klimenko, A.A. Baskakov, L.V. Sharapova

## TO THE PROBLEM OF CONTROLLABILITY IN FEEDBACK SYSTEMS

The analysis of the conditions for maintaining controllability in feedback systems based on the involvement of the principle of Ashby's necessary diversity is carried out. It is shown that when performing