

ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ РЛС ОТ МАСКИРУЮЩИХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ

Н. С. Акиншин¹, Р. П. Быстров², В. Л. Меньшиков³, Ю. И. Вареница⁴

¹ АО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения, Тула

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

³ Министерство обороны РФ

⁴ АО НИТИ, Москва

Статья поступила в редакцию 18 марта 2016 г.

Аннотация. Проведена теоретическая оценка защищенности РЛС от маскирующих помех, определяющих характеристики обнаружения, измерения и распознавания. Показано, что защищенность РЛС от активных шумовых помех, принимаемых по боковым лепесткам ДНА, определяется скрытностью и динамичностью изменения параметров зондирующего сигнала (ЗС). Исследован критерий обеспечения скрытности работы РЛС, исходя из жестких требований практики радиоэлектронной защиты. Проведен анализ параметров зондирующих сигналов для обеспечения скрытности пассивными методами.

Ключевые слова: радиолокационные системы, зондирующий сигнал, маскирующие помехи, скрытность работы, диаграмма направленности, боковой лепесток.

Abstract. The theoretical assessment of security of radar from the masking hindrances defining characteristics of detection, measurement and recognition are carried out. It is shown that security of RLS from the active noise hindrances accepted on lateral petals of the BOTTOM is defined by reserve and dynamism of change of parameters of the probing signal (PS). The criterion of ensuring reserve of work of RLS proceeding from requirements of practice of radio-electronic protection is investigated. The analysis of parameters of the probing signals for ensuring reserve with passive methods is carried out.

Keywords: radar-tracking systems, the probing signal, the masking hindrances, reserve of work, the directional pattern, a lateral petal.

Согласно существующей терминологии, маскирующие помехи при функционировании РЛС или как более точный их термин - противорадиолокационные помехи - это такие помехи, которые затрудняют или нарушают нормальную работу радиолокационных средств: процессы обнаружения полезного сигнала и измерения координат цели. Средства таких помех могут излучать шумовые колебания как непрерывно в течение некоторого времени (непрерывные шумовые помехи), так и только в ответ на принимаемые зондирующие сигналы подавляемой РЛС (ответно-импульсные шумовые помехи). Длительность ответного шумового излучения находится в пределах от сотен микросекунд до значения периода повторения импульсов подавляемой РЛС. Если это шумовые помехи, то они представляют собой электромагнитные колебания с хаотическим изменением по случайному закону амплитуды, частоты и фазы.

Поэтому рассматриваемые в настоящей статье вопросы оценки защищенности РЛС от маскирующих помех на основе предлагаемого обобщенного показателя является достаточно злободневным и нужным.

Остановимся для начала на оценке защищенности РЛС от маскирующих помех на основе обобщенного показателя, а затем проведем и анализ параметров зондирующих сигналов для обеспечения скрытности РЛС от такого вида пассивных помех.

1. Оценка защищенности РЛС от маскирующих помех на основе обобщенного показателя

Со ссылкой на источник [1] - обобщенным показателем защищенности РЛС от маскирующих помех, определяющим характеристики обнаружения, измерения и распознавания, является отношение сигнал/помеха на выходе устройства когерентной обработки

$$\rho = \frac{1}{K_{p\Sigma}} \frac{\sigma_s^2 T_0 \Delta f_0 K_s (V_r) F_z^4(\varepsilon)}{\left(N_0 + \frac{N_{ahp}}{V_{akp}} \right) \Delta f_0 + \frac{\sigma_{mos}^2}{V_{ls}} + \frac{\sigma_{mov}^2}{V_{lv}}} v_H, \quad (1)$$

где: $T_0 \Delta f_0$ - мощность и ширина спектра ЗС;

σ_s^2 - мощность отраженного сигнала на выходе антенной системы;

σ_{mos}^2 , σ_{mov}^2 и V_{ls} , V_{lv} - соответственно, мощность МО и эффективность когерентной компенсации МО от объемно и поверхностно распределенных отражателей;

N_0 , N_{ahp} - соответственно, спектральная плотность внутренних шумов приемника РЛС и АШП на выходе антенной системы;

V_{akp} - эффективность пространственной когерентной компенсации АШП; v_H - эффективность междупериодного когерентного накопления;

$K_s(V_r)$ - коэффициент преобразования отраженного сигнала по мощности в устройстве когерентной компенсации МО, зависящий от радиальной скорости цели V_r [2,3];

$K_{p\Sigma}$ - суммарный коэффициент потерь по мощности зондирующего и отраженного сигналов в антенно-волноводной системе, приемном устройстве, при распространении и из-за других факторов;

$F_z(\varepsilon)$ - интерференционный множитель Земли при наблюдении цели под углом ε .

Естественно, что при рассмотрении выражения (1) необходимо помнить о возможном наличии устройства некогерентного накопления, вариантности построения устройства автоматического обнаружения, которое кроме порогового обнаружителя может включать критерийный и межобзорный автообнаружители, влияющие на характеристики обнаружения.

Однако в сложной помеховой обстановке спектральный анализ принятого сигнала является наиболее приоритетным и, как правило, занимает практически все время наблюдения в контакте с объектом. Именно поэтому можно утверждать, что выражение (1) является наиболее приемлемым обобщенным показателем помехозащищенности РЛС на фоне маскирующих помех.

Из этого выражения видно, что защищенность РЛС от пассивных помех определяется следующими параметрами:

- величиной разрешаемого объема $\Delta V_p \cong \Delta \varepsilon \Delta \beta r^2 \Delta r$ или разрешающими способностями по дальности Δr , азимуту $\Delta \beta$ и углу места $\Delta \varepsilon$, а также анализируемой дальностью r , которые определяют мощность МО в анализируемом объеме;
- уровнем боковых лепестков спектра мешающих отражений (спектральной плотностью МО $S_{mov(v)}(\pi)$ [4], скоростью спада зубцов спектра МО), а также шириной спектра флуктуации МО, зависящей от длины волны λ и вида мешающих отражений; эффективностью когерентной компенсации МО $V_{ls(v)}$;
- эффективностью когерентного накопления v_H на фоне остатков МО.

Кроме того, мощность МО от поверхности σ_{mos}^2 при использовании квазинепрерывного (непрерывного) ЗС зависит от уровня боковых лепестков ДНА.

Защищенность РЛС от активных шумовых помех, принимаемых по боковым лепесткам ДНА, определяется, во-первых, скрытностью и динамичностью изменения параметров ЗС, что в итоге определяет ширину спектра АШП Δf_{ahp} и, соответственно, спектральную плотность АШП N_{ahp} во-вторых, уровнем боковых лепестков диаграмм направленности передающей η_{tm} и приемной η_{rs} антенн, который определяет величину N_{ahp} , а также возможности системы РЭП в определении параметров ЗС и постановке прицельной помехи; в-третьих, эффективностью пространственной когерентной компенсации АШП V_{akp} , принимаемой по боковым лепесткам ДНА; в-четвертых, эффективностью когерентного накопления v_H .

Кроме того, дальность действия РЛС зависит от ее энергopotенциала

$$Q_0 = P_0 T_0 \frac{T_H}{T_r} G_{tr} G_{rs}, \quad (2)$$

определяемого используемой энергией ЗС в течение времени наблюдения T_H цели, и коэффициентами усиления антенны на передачу G_{tr} и прием G_{rs} , связанными с разрешающими способностями $\Delta\varepsilon$ и $\Delta\beta$. Понятие энергопотенциала можно уточнить, учтя в выражении (2) значение интерференционного множителя Земли $F_z(h_a, h_t, r_t)$, радикально влияющего на потенциал РЛС на малых высотах и определяемого [5,6] длиной волны λ , высотой подъема антенны h_a , дальностью обнаружения r_t и высотой полета цели h_t (углом ε):

$$Q_0(\varepsilon) = P_0 T_0 \frac{T_H}{T_r} G_{tr} G_{rs} F_z^4(h_a, h_t, r_t) \quad (3)$$

Эффективность действия РЛС в условиях организованных активных помех в первую очередь определяется скрытностью работы РЛС, которую также можно характеризовать интегральным показателем скрытности - дальностью радиотехнической разведки (РТР) системы РЭП.

Дальность РТР, определяющая дальность постановки прицельных помех или решения на пуск ПРР, определяется отношением сигнал РЛС/помеха на выходе устройства когерентной обработки приемника РТР [7]:

$$\gamma_{pr.rtr} = \frac{\sigma_{s.rtr}^2 K_{SF}}{(N_{ortr} + N_{artr}) \Delta f_{pr.rtr}} \quad (4)$$

где: - $\sigma_{s.rtr}^2$ - мощность ЗС подавляемой РЛС на выходе антенны системы РЭП;

- $N_{ortr} = k_B K_{sh.rtr} T_{rtr}^o$ - спектральная плотность собственных шумов РПрУ системы РЭП, причем коэффициент шума РПрУ системы РЭП $K_{sh.rtr}$ имеет величину (десятки...сотни) единиц, что обуславливается использованием широкополосного УВЧ;

- $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ BT} \cdot \text{c} / \text{град}$ - постоянная Больцмана;

- N_{arttr} - спектральная плотность внешних помех в полосе анализа приемника РТР:
- $\Delta f_{pr.rtr}$ - полоса пропускания оконечного устройства когерентной обработки приемника РТР, которая в идеальном случае должна соответствовать ширине спектра зондирующего сигнала Δf_0 (например, 0.5 - 10 МГц);
- K_{SF} - коэффициент согласования полосы пропускания $\Delta f_{pr.rtr}$ и ширины спектра ЗС Δf_0

$$K_{SF} = \frac{\Delta f_{pr.rtr}}{\Delta f_0} \quad \text{при } \Delta f_{pr.rtr} \leq \Delta f_0; \quad K_{SF} = 1 \quad \text{при } \Delta f_{pr.rtr} = \Delta f_0 \quad (5)$$

Основными статистическими показателями качества обнаружения РЛС приемником РТР являются вероятности правильного D_{rtr} и ложного F_{rtv} обнаружения, для обеспечения которых необходимо иметь требуемое отношение сигнал РЛС/помеха $\gamma_{rtr.tr} = \gamma_{pr.rtr}(D_{rtr}, F_{rtv})$ на выходе устройства когерентной обработки приемника системы РЭП. Не вдаваясь в непринципиальные подробности построения некогерентной части обнаружителя приемника РТР, влияющие только на величину $\gamma_{rtr.tr}$, можно полагать, что для затруднения обнаружения РЛС и разведки параметров ЗС с требуемыми показателями качества необходимо выполнение неравенства [8]

$$\gamma_{pr.rtr} < \gamma_{rtr.tv} \quad (6)$$

а для гарантированного исключения обнаружения и разведки

$$\gamma_{pr.rtr} \leq K_{\mathcal{R}} \gamma_{rtr.tv} \quad (7)$$

где $\gamma_{pr.rtr}$ - текущее отношение сигнал/помеха на выходе когерентной части приемника РТР;

- $K_{\mathcal{R}}$ - коэффициент гарантированного не обнаружения, значение которого меньше единицы.

Для требования (7) пиковая мощность P_0 зондирующего сигнала РЛС с учетом выражений (3) и (4) должна удовлетворять неравенству:

$$P_0 G_{im} g_{Rl}(\epsilon_{rr}, \beta_{rr}) K_{SF} \leq K_{\gamma R} \gamma_{rtr.tv} \frac{(4\pi)^2 r_t^2}{\lambda^2 G_{pv.rtr} F_Z^2(h_a, h_t, r_t)} (N_{0rtr} + N_{artv}) \Delta f_{pr.rtr}, \quad (8)$$

При отсутствии учета потерь распространения для приема ЗС системой РЭП по главному лепестку ДНА РЛС выражение (8) преобразуется к виду

$$P_0 G_{im} K_{SF} \leq K_{\gamma R} \gamma_{rtr.tv} \frac{(4\pi)^2 r_t^2}{\lambda^2 G_{pr.rtv} F_Z^2(h_a, h_t, r_t)} (N_{0rtv} + N_{artv}) \Delta f_{pv.rtv}, \quad (9)$$

а при приеме по боковым лепесткам ДНА РЛС требуется выполнение неравенства

$$P_0 G_{im} \eta_{im} K_{SF} \leq K_{\gamma R} \gamma_{rtr.tv} \frac{(4\pi)^2 r_t^2}{\lambda^2 G_{pr.rtv} F_Z^2(h_a, h_t, r_t)} (N_{0rtr} + N_{artv}) \Delta f_{pv.rtv}, \quad (10)$$

где η_{im} - уровень боковых лепестков ДН передающей антенны РЛС.

Выражения (8) - (10) определяют взаимосвязь пространственно-временных параметров ЗС РЛС и параметров приемника РТР системы РЭП в условиях внешних помех. Определим критерий обеспечения скрытности исходя из жестких требований практики радиоэлектронной защиты: "скрытность работы РЛС считается обеспеченной, если текущее отношение сигнал/помеха на выходе когерентной части приемника РТР равно единице, то есть

$$\gamma_{pr.rtv} = 1 \quad (11)$$

В соответствии с критерием при отсутствии внешних помех скрытность обеспечивается при выполнении неравенств: скрытность по главному лепестку ДНА РЛС скрытность по боковым лепесткам при [9]

$$P_0 G_{im} \eta_{im} K_{SF} \leq \frac{(4\pi)^2 r_t^2}{\lambda^2 G_{pr.rtv} F_Z^2(h_a, h_t, r_t)} N_{0rtr} \Delta f_{pv.rtv} \quad (12)$$

Если параметры антенны заданы, то из предыдущих выражений можно найти выражения для предельной импульсной мощности, исключающей РТР и используемой на этапе определения параметров ЗС:

при обеспечении скрытности по главному лепестку ДНА РЛС

$$P_{0rv} = \frac{(4\pi)^2 r_t^2}{G_{im} \eta_{im} K_{SF} \lambda^2 G_{pr.rtv} F_Z^2(h_a, h_t, r_t)} N_{0rv} \Delta f_{pr.rtv} \quad (13)$$

при обеспечении скрытности по боковым лепесткам ДНА РЛС

$$P_{0rv} = \frac{(4\pi)^2 r_t^2}{G_{im} \eta_{im} K_{SF} \lambda^2 G_{pr.rtr} F_Z^2(h_a, h_t, r_t)} N_{0rv} \Delta f_{pr.rtr} \quad (14)$$

Таким образом, в качестве выводов можно сделать следующие заключения:

1. Анализ выражений (6) и (11) позволяет определить основные направления пассивных методов обеспечения скрытности РЛС - снижение импульсной мощности P_0 , снижение коэффициента усиления антенны G_{im} на передачу, снижение уровня боковых лепестков ДНА η_{im} на передачу, увеличение ширины спектра Δf_0 , направленное на уменьшение $K_{SF} = \Delta f_{pr.rtv} / \Delta f_0$.

2. Необходимо также отметить, что перечисленные направления обеспечения скрытности несут в себе проблему снижения ее энергопотенциала и, соответственно, приводят к затруднениям в обеспечении требуемых характеристик РЛС. Компромиссным решением этого противоречия является синтез апертуры антенны и способ межпачечной амплитудно-фазовой демодуляции.

2. Анализ параметров зондирующих сигналов для обеспечения скрытности пассивными методами

Исследуем критерий обеспечения скрытности работы, РЛС пассивными методами, в соответствии с которым при отсутствии внешних помех скрытность по главному лепестку ДНА РЛС обеспечивается при выполнении неравенства (13), а по боковым лепесткам - при выполнении неравенства (14). Для этих неравенств были проведены расчеты максимальных значений пиковой мощности ЗС P_{0max} при отсутствии влияния интерференционного множителя и

потерь при распространении $K_{p-r}(r_l, \lambda)$. Необходимо отметить, что учет *потерь при распространении* осуществляется путем умножения правых частей неравенств (13) и (14) на коэффициент $K_{p-r}(r_l, \lambda)$ для дальности РТР. Этот коэффициент может изменяться [10] от единиц до десятков (сотен) в зависимости состава атмосферы, а также величин r_l и λ .

Результаты расчетов без учета $K_{p-r}(r_l, \lambda)$, представленные в табл. 1-6, получены с учетом характеристик современных приемников РТР при $G_{pr.rtr}=10$ для следующих типовых характеристик РЛС: диаграмма направленности антенны - игольчатая, а ее ширина имела четыре значения, причем для табл. 1-4 - $\Delta\theta_1 = 2^\circ$, $\Delta\theta_2 = 3^\circ$, $\Delta\theta_3 = 4^\circ$, $\Delta\theta_4 = 5^\circ$, а для табл. 5 и 6 $\Delta\theta_1 = 0,7^\circ$, $\Delta\theta_2 = 0,9^\circ$, уровень боковых лепестков соответствующих ДНА имел значения для расчетов в табл. 1-4 - $\eta_{m1} = -35 \text{ дБ}$, $\eta_{m2} = -30 \text{ дБ}$, $\eta_{m3} = -25 \text{ дБ}$, $\eta_{m4} = -20 \text{ дБ}$, а в табл. 5 и 6 - $\eta_{m1} = -45 \text{ дБ}$, $\eta_{m2} = -40 \text{ дБ}$, $\eta_{m3} = -35 \text{ дБ}$, $\eta_{m4} = -30 \text{ дБ}$, длина волны имела значения для расчетов в табл. 1 и 2 - $\lambda = 0.2 \text{ м}$, в табл. 3 и 4 $\lambda = 0.05 \text{ м}$, а в табл. 5 и 6 - $\lambda = 0.02 \text{ м}$.

Таблица 1.

Пиковые мощности P_{0max} при РТР по главному лепестку ДНА, Вт

Δf_0 МГц	Дальность радиотехнической разведки, км						
	100	150	200	250	300	350	400
0,5	0.12	0.27	0.48	0.75	1.08	1.47	1.92
	0.27	0.61	1.08	1.68	2.43	3.31	4.32
	0,48	1.08	1.92	3.0	4.32	5.88	7.68
	0.75	1.69	3.0	4.69	6.75	9.19	12.0
5,0	1.2	2.7	4.8	7.5	10.8	14.7	19.2
	2.7	6.1	10.8	16.9	24.3	33.1	43.2
	4.8	10.8	19.2	30.0	43.2	58.8	76.8
	7.5	16.9	30.0	46.9	67.5	91.9	120.0
10,0	2.4	5.4	9.6	1.5	21.6	29.4	38.4
	5.4	12.5	21.6	33.76	48.6	66.2	86.4
	9.6	21.6	38.4	60.0	86.4	117.6	153.6
	15.0	33.75	60.0	93.76	135.0	183.8	240.0
20,0	4.8	10.8	19.2	30.0	43.2	58.8	76.8
	10.8	24.3	43.2	67.5	97.2	132.3	172.8
	19.2	43.2	76.8	120.1	172.8	235.2	307.2
	30.0	67.5	120.0	187.5	270.0	367.5	480.1

Таблица 2.

Пиковые мощности P_{0max} при РТР по главному лепестку ДНА, Вт

Δf_0 МГц	Дальность радиотехнической разведки, км						
	100	150	200	250	300	350	400
0,5	379,5	853,9	$1,52 \cdot 10^3$	$2,37 \cdot 10^3$	$3,41 \cdot 10^3$	$4,65 \cdot 10^3$	$6,07 \cdot 10^3$
	270,1	607,6	$1,08 \cdot 10^3$	$1,69 \cdot 10^3$	$2,43 \cdot 10^3$	$3,31 \cdot 10^3$	$4,32 \cdot 10^3$
	151,8	341,6	607,2	948,8	$1,37 \cdot 10^3$	$1,86 \cdot 10^3$	$2,43 \cdot 10^3$
	75,0	168,8	300,0	468,8	675,1	918,9	$1,2 \cdot 10^3$
5,0	$3,79 \cdot 10^3$	$8,53 \cdot 10^3$	$1,52 \cdot 10^4$	$2,37 \cdot 10^4$	$3,41 \cdot 10^4$	$4,65 \cdot 10^4$	$6,07 \cdot 10^4$
	$2,70 \cdot 10^3$	$6,07 \cdot 10^3$	$1,08 \cdot 10^4$	$1,69 \cdot 10^4$	$2,43 \cdot 10^4$	$3,31 \cdot 10^4$	$4,32 \cdot 10^4$
	$1,51 \cdot 10^3$	$3,41 \cdot 10^3$	$6,07 \cdot 10^3$	$9,48 \cdot 10^3$	$1,37 \cdot 10^4$	$1,86 \cdot 10^4$	$2,43 \cdot 10^4$
	750	$1,68 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^3$	$4,68 \cdot 10^3$	$6,75 \cdot 10^3$	$9,18 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^4$
10,0	$7,59 \cdot 10^3$	$1,71 \cdot 10^4$	$3,03 \cdot 10^4$	$4,74 \cdot 10^4$	$6,83 \cdot 10^4$	$9,3 \cdot 10^4$	$1,21 \cdot 10^4$
	$5,4 \cdot 10^3$	$1,22 \cdot 10^4$	$2,16 \cdot 10^4$	$3,38 \cdot 10^4$	$4,86 \cdot 10^4$	$6,62 \cdot 10^4$	$8,64 \cdot 10^4$
	$3,04 \cdot 10^3$	$6,83 \cdot 10^3$	$1,21 \cdot 10^4$	$1,89 \cdot 10^4$	$2,73 \cdot 10^4$	$3,72 \cdot 10^4$	$4,86 \cdot 10^4$
	$1,5 \cdot 10^3$	$3,38 \cdot 10^3$	$6,0 \cdot 10^3$	$9,38 \cdot 10^3$	$1,35 \cdot 10^4$	$1,64 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4$
20,0	$1,52 \cdot 10^4$	$3,41 \cdot 10^4$	$6,07 \cdot 10^4$	$9,5 \cdot 10^4$	$1,37 \cdot 10^4$	$1,86 \cdot 10^4$	$2,43 \cdot 10^4$
	$1,08 \cdot 10^4$	$2,43 \cdot 10^4$	$4,32 \cdot 10^4$	$6,75 \cdot 10^4$	$9,72 \cdot 10^4$	$1,32 \cdot 10^4$	$1,73 \cdot 10^4$
	$6,07 \cdot 10^4$	$1,37 \cdot 10^4$	$2,43 \cdot 10^4$	$3,8 \cdot 10^4$	$5,47 \cdot 10^4$	$7,44 \cdot 10^4$	$9,72 \cdot 10^4$
	$3,0 \cdot 10^3$	$6,75 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,88 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^4$	$3,69 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^4$

Таблица 3.

Пиковые мощности P_{0max} при РТР по боковым лепесткам ДНА, Вт

Δf_0 МГц	Дальность радиотехнической разведки, км						
	100	150	200	250	300	350	400
1.5	1.44	3.24	5.76	9.0	12.96	17.64	23.0
	3.24	7.29	12.96	20.25	29.17	39.7	51.85
	5.76	12.96	23.04	36.0	51.85	10.57	92.17
	9.0	20.25	36.0	56.26	81.0	110.3	144.0
5.0	4.8	10.8	19.2	30.0	43.2	58.8	76.8
	10.8	24.3	43.2	67.5	97.2	132.33	172.84
	19.2	43.2	76.8	120.0	172.8	235.23	307.24
	30.0	67.5	120.0	187.5	270.0	367.54	480.06
10.0	9.6	21.6	38.4	60.0	86.41	117.61	153.62
	21.6	48.61	86.42	135.03	194.44	264.66	345.66
	38.4	86.41	153.62	240.03	345.64	470.46	614.47
	60.0	135.02	240.03	375.04	540.06	735.09	960.15
20.0	19.2	43.2	76.81	120.0	172.82	235.23	307.24
	43.2	97.2	172.84	270.06	388.89	529.32	691.35
	76.8	172.82	307.24	480.06	691.28	940.91	$1.23 \cdot 10^3$
	120.0	270.03	480.06	750.09	$1.08 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^3$	$1.92 \cdot 10^3$

Таблица 4.

Пиковые мощности P_{0max} при РТР по боковым лепесткам ДНА, Вт

Δf_0 МГц	Дальность радиотехнической разведки, км						
	100	150	200	250	300	350	400
1.5	$1.44 \cdot 10^4$	$3.24 \cdot 10^4$	$5.76 \cdot 10^4$	$9.0 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^5$	$1.76 \cdot 10^5$	$2.3 \cdot 10^5$
	$1.02 \cdot 10^4$	$2.3 \cdot 10^4$	$4.09 \cdot 10^4$	$6.4 \cdot 10^4$	$9.22 \cdot 10^4$	$1.26 \cdot 10^5$	$1.64 \cdot 10^5$
	$5.76 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^4$	$2.3 \cdot 10^4$	$3.6 \cdot 10^4$	$5.18 \cdot 10^4$	$7.06 \cdot 10^4$	$9.22 \cdot 10^4$
	$2.85 \cdot 10^3$	$6.4 \cdot 10^3$	$1.14 \cdot 10^4$	$1.78 \cdot 10^4$	$2.56 \cdot 10^4$	$3.49 \cdot 10^4$	$4.55 \cdot 10^4$
5.0	$4.8 \cdot 10^4$	$1.08 \cdot 10^5$	$1.92 \cdot 10^5$	$3.0 \cdot 10^5$	$4.32 \cdot 10^5$	$5.88 \cdot 10^5$	$7.68 \cdot 10^5$
	$3.42 \cdot 10^4$	$7.69 \cdot 10^4$	$1.37 \cdot 10^5$	$2.14 \cdot 10^5$	$3.07 \cdot 10^5$	$4.18 \cdot 10^5$	$5.46 \cdot 10^5$
	$1.92 \cdot 10^4$	$4.32 \cdot 10^4$	$7.68 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^5$	$1.73 \cdot 10^5$	$2.35 \cdot 10^5$	$3.07 \cdot 10^5$
	$9.49 \cdot 10^3$	$2.13 \cdot 10^4$	$3.79 \cdot 10^4$	$5.93 \cdot 10^4$	$8.54 \cdot 10^4$	$1.16 \cdot 10^5$	$1.52 \cdot 10^5$
10.0	$9.6 \cdot 10^4$	$2.16 \cdot 10^5$	$3.84 \cdot 10^5$	$6.0 \cdot 10^5$	$8.64 \cdot 10^5$	$1.18 \cdot 10^6$	$1.54 \cdot 10^6$
	$6.83 \cdot 10^4$	$1.54 \cdot 10^5$	$2.73 \cdot 10^5$	$4.27 \cdot 10^5$	$6.15 \cdot 10^5$	$8.37 \cdot 10^5$	$1.09 \cdot 10^6$
	$3.84 \cdot 10^4$	$8.64 \cdot 10^4$	$1.54 \cdot 10^5$	$2.4 \cdot 10^5$	$3.46 \cdot 10^5$	$4.7 \cdot 10^5$	$6.14 \cdot 10^5$
	$1.89 \cdot 10^4$	$4.27 \cdot 10^4$	$7.59 \cdot 10^4$	$1.19 \cdot 10^5$	$1.79 \cdot 10^5$	$2.32 \cdot 10^5$	$3.04 \cdot 10^5$
20.0	$1.92 \cdot 10^5$	$4.32 \cdot 10^5$	$7.68 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^6$	$1.73 \cdot 10^6$	$2.35 \cdot 10^6$	$3.07 \cdot 10^6$
	$1.37 \cdot 10^5$	$3.07 \cdot 10^5$	$5.47 \cdot 10^5$	$8.54 \cdot 10^5$	$1.23 \cdot 10^6$	$1.67 \cdot 10^6$	$2.18 \cdot 10^6$
	$7.68 \cdot 10^4$	$1.73 \cdot 10^5$	$3.07 \cdot 10^5$	$4.8 \cdot 10^5$	$6.91 \cdot 10^5$	$9.41 \cdot 10^5$	$1.23 \cdot 10^6$
	$3.79 \cdot 10^4$	$8.54 \cdot 10^4$	$1.52 \cdot 10^5$	$2.37 \cdot 10^5$	$3.42 \cdot 10^5$	$4.65 \cdot 10^5$	$6.07 \cdot 10^5$

Таблица 5.

Пиковые мощности P_{0max} при РТР по главному лепестку ДНА, Вт

Δf_0 МГц	Дальность радиотехнической разведки, км						
	5	15	25	35	45	55	65
2.5	-	0.08705	0.24180	0.474	0.783	1.17	1.635
	0.0159	0.14390	0.39972	0.783	1.295	1.935	2.702
	0.02388	0.21496	0.59713	1.17	1.935	2.89	4.037
	0.03336	0.30024	0.8340	1.635	2.702	4.037	5.638
5.0	0.01934	0.1741	0.4836	0.9479	1.567	2.341	3.269
	0.03198	0.2878	0.7994	1.567	2.590	3.869	5.404
	0.04777	0.4299	1.194	2.341	3.869	5.780	8.073
	0.06672	0.6005	1.668	3.269	5.404	8.073	11.276
10.0	0.03869	0.348	0.967	1.896	3.134	4.681	6.538
	0.06396	0.576	1.599	3.134	5.180	7.739	10.81
	0.09554	0.859	2.389	4.681	7.739	11.56	16.15
	0.13344	1.201	3.336	6.539	10.81	16.15	22.55
20.0	0.0774	0.6964	1.934	3.792	6.268	9.363	13.08
	0.1279	1.1512	3.198	6.268	10.36	15.48	21.62
	0.1910	1.7197	4.777	9.362	15.48	23.12	32.29
	0.2669	2.4019	6.672	13.08	21.62	32.29	45.10

Таблица 6.

Пиковые мощности P_{0max} при РТР по главному лепестку ДНА, Вт

Δf_0 МГц	Дальность радиотехнической разведки, км						
	5	15	25	35	45	55	65
2.5	305.86	$2.75 \cdot 10^3$	$7.65 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^4$	$2.48 \cdot 10^4$	$3.7 \cdot 10^4$	$5.17 \cdot 10^4$
	159.89	$1.44 \cdot 10^3$	$3.99 \cdot 10^3$	$7.83 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^4$	$1.93 \cdot 10^4$	$2.7 \cdot 10^4$
	75.53	679.78	$1.89 \cdot 10^3$	$3.70 \cdot 10^3$	$6.12 \cdot 10^3$	$9.14 \cdot 10^3$	$1.28 \cdot 10^4$
	33.36	300.24	834.0	$1.63 \cdot 10^3$	$2.7 \cdot 10^3$	$4.04 \cdot 10^3$	$5.64 \cdot 10^3$
5.0	611.73	$5.51 \cdot 10^3$	$1.53 \cdot 10^4$	$2.99 \cdot 10^4$	$4.96 \cdot 10^4$	$7.40 \cdot 10^4$	$1.03 \cdot 10^5$
	319.78	$2.88 \cdot 10^3$	$7.99 \cdot 10^3$	$1.57 \cdot 10^4$	$2.59 \cdot 10^4$	$3.87 \cdot 10^4$	$5.40 \cdot 10^4$
	151.06	$1.36 \cdot 10^3$	$3.78 \cdot 10^3$	$7.40 \cdot 10^3$	$1.22 \cdot 10^4$	$1.83 \cdot 10^4$	$2.55 \cdot 10^4$
	66.72	600.5	$1.67 \cdot 10^3$	$3.27 \cdot 10^3$	$5.4 \cdot 10^3$	$8.07 \cdot 10^3$	$1.13 \cdot 10^4$
10.0	$1.22 \cdot 10^3$	$1.10 \cdot 10^4$	$3.06 \cdot 10^4$	$5.99 \cdot 10^4$	$9.91 \cdot 10^4$	$1.48 \cdot 10^4$	$2.07 \cdot 10^5$
	639.56	$5.76 \cdot 10^3$	$1.59 \cdot 10^4$	$3.13 \cdot 10^4$	$5.18 \cdot 10^4$	$7.74 \cdot 10^4$	$1.08 \cdot 10^4$
	302.12	$2.72 \cdot 10^3$	$7.55 \cdot 10^3$	$1.48 \cdot 10^4$	$2.45 \cdot 10^4$	$3.66 \cdot 10^4$	$5.11 \cdot 10^4$
	133.44	$1.20 \cdot 10^3$	$3.34 \cdot 10^3$	$6.54 \cdot 10^3$	$1.08 \cdot 10^4$	$1.61 \cdot 10^4$	$2.26 \cdot 10^4$
20.0	$2.45 \cdot 10^3$	$2.20 \cdot 10^4$	$6.12 \cdot 10^4$	$1.19 \cdot 10^5$	$1.98 \cdot 10^5$	$2.96 \cdot 10^5$	$4.14 \cdot 10^5$
	$1.28 \cdot 10^3$	$1.15 \cdot 10^4$	$3.19 \cdot 10^4$	$6.27 \cdot 10^4$	$1.04 \cdot 10^5$	$1.55 \cdot 10^5$	$2.16 \cdot 10^5$
	604.25	$5.44 \cdot 10^3$	$1.51 \cdot 10^4$	$2.96 \cdot 10^4$	$4.89 \cdot 10^4$	$7.31 \cdot 10^4$	$1.02 \cdot 10^5$
	266.88	$2.40 \cdot 10^3$	$6.67 \cdot 10^3$	$1.31 \cdot 10^4$	$2.16 \cdot 10^4$	$3.23 \cdot 10^4$	$4.51 \cdot 10^4$

Эти результаты позволяют внести количественную определенность при формировании требований к мощности ЗС РЛС и показывают следующее:

- современные цифровые приемники РТР (тем более канализированные) гарантированно обнаруживают ЗС существующих РЛС по главному лепестку ДНА, а также удовлетворительно по боковым лепесткам на дальностях (50 - 100) км при импульсной мощности ЗС от 2 до 50 кВт;

- максимальная пиковая мощность ЗС P_{0max} , при которой РЛС не обнаруживается, увеличивается прямо пропорционально увеличению ширины спектра ЗС и обратно пропорционально коэффициенту усиления и уровню боковых лепестков антенны РЛС;

- выражение (11) с учетом затухания при распространении позволяет осуществлять оптимизацию мощности ЗС РЛС в процессе работы для исключения РТР по боковым лепесткам ДНА, а также накладывает

ограничения на пиковую мощность ЗС при проектировании РЛС. Выражения (11 и (12) позволяют определить значение $P_{0\max}$, с использованием которого можно сформулировать требование к времени когерентного накопления:

$$T_{kn} \geq \frac{p_{tr} K_{p\Sigma}}{\sigma_s^2 K_s (V_r) F_{\Xi}^4(\varepsilon) T_0 \Delta f_0} \frac{T_r}{\left(N_0 \Delta f_0 + \frac{\sigma_{mos}^2}{v_{ls}} + \frac{\sigma_{mov}^2}{v_{ls}} \right)} \quad (15)$$

Для упрощения анализа (15), который приводит к некоторому занижению T_{kn} , будем полагать следующее:

мешающие отражения компенсируются до уровня внутренних шумов;
преобразование отраженного сигнала в устройстве когерентной компенсации МО осуществляется без потерь.

С учетом этого (15) преобразуется к виду [11, 12]:

$$T_{kn} \geq \frac{p_{tr} K_{p\Sigma}}{\sigma_s^2 F_{\Xi}^4(\varepsilon) T_0} \frac{T_r}{3N_0} \quad (16)$$

или

$$T_{kn} \geq \frac{p_{tr} (4\pi)^3 r_1^4}{\sigma_1 \lambda^2 P_{0\max} G_{tr} G_{rs} F_{\Xi}^4(\varepsilon) T_0} \frac{T_r}{K_{p\Sigma}} 3N_0 \quad (17)$$

Важно отметить, что при сохранении основных характеристик РЛС увеличение времени ведет в общем случае к увеличению требуемого значения $p_{tr} = p(D_{tr}, F_{tr})$ в связи с увеличением числа элементов анализа m_r по доплеровской частоте.

В табл. 7 представлены результаты анализа требуемого времени когерентного накопления, полученные для следующих характеристик РЛС - диаграмма направленности антенны игольчатая, $\Delta\theta = 2^0$, $G_{tr} = G_{rs} = 10^4$, $\lambda = 0.2\text{ м}$, $T_r/T_0 = 100$, $K_{p\Sigma} = 10$, коэффициент шума РПрУ $k_{sh} = 10$, $F_z(\varepsilon) = 0.5$, $\sigma_1 = 1\text{ м}^2$. Для $\Delta\theta_1 = 2^0$ требуемое отношение сигнал/помеха было зафиксировано равным $p_{tr} = 100$.

Требуемое время когерентного накопления

Δf_0 МГц	<i>Дальность цели, км</i>						
	100	150	200	250	300	350	400
0,5	0,26	0,585	1,038	1,625	2,34	3,18	4,16
5	0,026	0,0585	0,1038	0,1625	0,234	0,318	0,416

Таким образом, расчеты показывают, что скрытность работы РЛС может повышаться путем увеличения времени когерентного накопления при использовании сложных ЗС. В то же время при скорости последовательного обзора по азимуту 36 град/с и одновременном обзоре по другим координатам время наблюдения составляет для приведенных условий 55.5.мс. Для реализации необходимого времени когерентного накопления при $\Delta f_0 = 5 \text{ МГц}$ на дальностях, превышающих 150 км, и жестких требованиях к скорости обзора пространства необходимо использовать РЛС с адаптивным пространственно-временным когерентным накоплением, структура которой описана в [11,12]. Анализ показал, что пассивные методы, направленные на оптимизацию параметров зондирующего сигнала, реально обеспечивают скрытность работы РЛС только по боковым лепесткам ДНА и могут быть использованы для исключения наведения противорадиолокационных ракет (ПРР) по боковым лепесткам ДНА РЛС. Для обеспечения скрытности работы по главному лепестку ДНА РЛС необходимо использовать активные методы.

Литература

1. Меньшиков В.Л., Антонов К.А., Посохов А.А., Сушков А. В. Оценка защищенности РЛС от маскирующих помех на основе обобщенного показателя. // Научно-технические труды ТАИИ, 2006.

2. Алексеев Ю.Я. и др. Способы и средства помехозащиты радиолокационных измерителей дальности и скорости в режимах сопровождения. // Успехи современной радиоэлектроники. Вып.1. - Москва, 2000. - С. 3 - 64.

3. Гейстер С.Р. Статистические характеристики спектрального портрета помех от дождевых облаков в сантиметровом диапазоне волн// Электромагнитные волны и электронные системы. - 2000. - Т. 5. - № 2. - С. 50-57.

4. Гейстер С.Р., Курлович В.И. Результаты экспериментальных исследований комбинированных доплеровско - флуктуационных портретов целей в РЛС с непрерывным излучением. // Вопросы специальной радиоэлектроники: науч. техн. сб. сер. СОИУ. Вып.6. - 1991. - С.67-79.

5. Андрианов В.А., Арманд Н.А., Кибардина В.А. Рассеяние радиоволн подстилающей поверхностью с растительным покровом. // Радиотехника и электроника. - 1976. - № 9. - С. 1816 - 1821.

6. Слока В.К. Вопросы обработки радиолокационных сигналов. - М.: Сов.радио, 1970. - 256 с.

7. Охрименко А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Часть 1. Основы радиолокации. - М.: Воениздат, 1983. - 456с.

8. Меньшиков В.Л., Шаманаев А.В., Карабанов Р.М. Анализ параметров зондирующих сигналов для обеспечения скрытности пассивными методами. // Научно-технические труды ТАИИ, 2006.

9. Быстров Р.П., Дмитриев В.Г., Меньшиков В.Л., Перунов Ю.М., Потапов А.А. Теоретическая оценка современных методов и способов снижения радиолокационной заметности объектов и систем в условиях радиоэлектронного противодействия. // «Нелинейный мир», № 7, т.13, 2015. - с. 3-24.

10. Гейстер С.Р. Статистические характеристики спектрального портрета помех от дождевых облаков в сантиметровом диапазоне волн. // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2000. - Т. 5. - № 2. - С. 50-57.

11. А.с. 291845 СССР, МКл4 G01S 13/78. Устройство специальное/ С.Р. Гейстер, В.И. Курлович, А.Е. Охрименко, В.П. Букато (СССР). - № 3199717; Заявлено 16.05.88; Зарегистр. 1.04.89.

12. А.с. 299715 СССР, МКл4 G01S 13/78. Устройство специальное/ С.Р. Гейстер, В.И. Курлович, С.В. Шаляпин, И.А. Дащинский (СССР). - № 4500803; Заявлено 18.10.88; Зарегистр. 1.08.89.