

аУДК 621.391.67.012

О КРИТЕРИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СКРЫТНОСТИ РАБОТЫ РЛС ПАССИВНЫМИ МЕТОДАМИ

Н. С. Акиншин¹, Р. П. Быстров², В. Л. Меньшиков³

¹ АО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения,
300034, Тула, ул. Демонстрации, 36

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

³ Министерство Обороны РФ, Москва

Статья поступила в редакцию 23 мая 2017 г.

Аннотация. Важнейшей проблемой при создании современных РЛС является повышение их скрытности и заметности от средств радиотехнической разведки (РТР) противоборствующей стороны. В диапазоне радиоволн это достигается путем создания малоотражающих конструкций антенных систем радиолокационных систем (РЛС) в различных частотных диапазонах и снижения уровня излучения бортовой радиоаппаратуры радиоэлектронных средств (РЭС) до уровня фона. Методы расчета уровней излучения РЛС по основному и боковым лепесткам диаграммы направленности антенн хорошо исследованы, и библиография по указанному вопросу насчитывает десятки наименований. Однако большое многообразие типов РЛС и условий их наблюдения средствами РТР приводит к тому, что не полностью исследованными остаются проблемы выбора типов и характеристик зондирующих сигналов РЛС для обеспечения скрытности пассивными методами. Поэтому целью работы поставлено формирование требований к мощности зондирующего сигнала (ЗС) РЛС для обеспечения скрытности ее функционирования и анализ требуемого времени когерентного накопления при использовании сложных ЗС. Исследован критерий обеспечения скрытности работы РЛС пассивными методами. Проведены расчеты максимальных значений пиковой мощности зондирующего сигнала при отсутствии влияния интерференционного множителя и потерь при распространении с учетом характеристик современных приемников радиотехнической разведки. Сформулированы требования к времени когерентного накопления. Показано,

что для выполнения этих требований необходимо использовать РЛС с адаптивным пространственно-временным когерентным накоплением, пассивные методы реально обеспечивают скрытность работы только по боковым лепесткам диаграммы направленности РЛС.

Ключевые слова: радиолокация, антенны, диаграмма направленности, когерентное накопление.

Abstract. The major problem of creation of modern RES is the increase of their security and visibility from equipment of radio engineering investigation (RTR) of the contradictory party. In the range of radio waves it is reached by creation of the low-reflecting designs of antenna systems of radar-tracking systems (RTS) in various frequency ranges and decrease of radiation level of onboard radio equipment of radio-electronic means (RES) to background level. Methods of calculation of levels of radiation of RTS for the basic and lateral lobes of the directional pattern of antennas are well investigated and the bibliography on the specified question totals tens numbers. However, the big variety of the RTS types and conditions of their supervision by means of RTR leads to insufficient research of the problems of a choice of types and characteristics of the probing RTS signals for ensuring security by passive methods. Therefore the purpose of work is the formation of requirements to the power of the probing signal (PS) of RTS for ensuring security of its functioning and the analysis of the required time of coherent accumulation when using difficult PS. The criterion of ensuring security of RTS operation by passive methods is investigated. Calculations of the maximum values of peak power of the probing signal in the absence of influence of an interferential multiplier and losses during distribution, taking into account characteristics of modern receivers of radio engineering investigation, are carried out. Requirements to time of coherent accumulation are formulated. It is shown that for implementation of these requirements it is necessary to use RTS with adaptive existential coherent accumulation. Passive methods really provide security of operation on lateral lobes of the directional pattern of RLS.

Keywords: radar-tracking system, antenna, directional pattern, coherent accumulation.

1. Критерий обеспечения скрытности РЛС

Исследуем критерий обеспечения скрытности работы РЛС пассивными методами, в соответствии с которым при отсутствии внешних помех скрытность для предельной импульсной мощности P_{0rtr} , исключающей РТР по основному и боковым лепесткам ДНА, обеспечивается при выполнении неравенств [1-4]:

$$P_{0rtr} \leq \frac{(4\pi)^2 r^2}{G_{tm} K_{SF} \lambda^2 G_{pr.rtr} F_Z^2 (h_a, h_t, r_r)} N_{0rtr} \Delta f_{pr.rtr} \quad (1)$$

$$P_{0rtr} \leq \frac{(4\pi)^2 r^2}{G_{tm} \eta_{tm} K_{SF} \lambda^2 G_{pr.rtr} F_Z^2 (h_a, h_t, r_r)} N_{0rtr} \Delta f_{pr.rtr} \quad (2)$$

где η_{tm} - уровень боковых лепестков ДН передающей антенны РЛС; K_{SF} - коэффициент согласования полосы пропускания $\Delta f_{pr.rtr}$ и ширины спектра зондирующего сигнала Δf_0 (например, 0.5 - 10 МГц)

$$(K_{SF} = \frac{\Delta f_{pr.rtr}}{\Delta f_0} \quad \text{при} \quad \Delta f_{pr.rtr} \leq \Delta f_0; \quad K_{SF} = 1 \quad \text{при} \quad F_z (h_a, h_t, r_t)$$

$\Delta f_{pr.rtr} = \Delta f_0$); G_{tm} - коэффициенты усиления антенны на передачу и прием соответственно; λ - длина волны; h_a - высота подъема антенны РЛС; r_t - дальность обнаружения цели; h_t - высота полета цели (под углом ε) [25];

$N_{0rtr} = k_B K_{sh rtr} T_{rtr}^o$ - спектральная плотность собственных шумов радиоприемного устройства (РПрУ) системы РЭП, причем коэффициент шума РПрУ системы РЭП $K_{sh rtr}$ имеет величину (десятки...сотни) единиц, что обуславливается использованием широкополосного УВЧ.

2. Расчеты максимальных значений пиковой мощности зондирующего сигнала при отсутствии влияния интерференционного множителя

Проведенные расчеты проводились с учетом характеристик современных приемников радиотехнической разведки. и потерь при распространении зондирующего сигнала.

Для этих неравенств были проведены расчеты максимальных значений пиковой мощности ЗС $P_{0\max}$ при отсутствии влияния интерференционного множителя и потерь при распространении $K_{p-r}(r_1, \lambda)$. Заметим, что учет потерь при распространении осуществляется путем умножения правых частей неравенств (1) и (2) на коэффициент $K_{p-r}(r_1, \lambda)$ для дальности РТР. Этот коэффициент может изменяться [5] от единиц до десятков (сотен) в зависимости состава атмосферы, а также величин r_t и λ [6].

Некоторые результаты вычислений без учета $K_{p-r}(r_1, \lambda)$ представлены в табл. 1,2. Расчеты проведены с учетом характеристик современных приемников РТР при $G_{pr.rtr} = 10$ для следующих типовых характеристик РЛС: диаграмма направленности антенны - игольчатая, а ее ширина- $\Delta\theta_1 = 2^\circ, \Delta\theta_2 = 3^\circ$; уровень боковых лепестков соответствующих ДНА $\eta_{tm1} = -35$ дБ, $\eta_{tm2} = -30$ дБ; длина волны - $\lambda = 0,2$ м.

Таблица.1.

Пиковые мощности $P_{0\max}$ 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
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 $P_{0\max}$ при РТР по боковым лепесткам 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	$1,52 \cdot 10^4$	$3,41 \cdot 10^4$	$6,07 \cdot 10^4$	$9,5 \cdot 10^4$	$1,37 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	$2,43 \cdot 10^4$
	$1,08 \cdot 10^4$	$2,43 \cdot 10^4$	$4,32 \cdot 10^4$	$6,75 \cdot 10^4$	$9,72 \cdot 10^4$	$1,32 \cdot 10^4$	$1,73 \cdot 10^4$
	$6,07 \cdot 10^4$	$1,37 \cdot 10^4$	$2,43 \cdot 10^4$	$3,8 \cdot 10^4$	$5,47 \cdot 10^4$	$7,44 \cdot 10^4$	$9,72 \cdot 10^4$
	$3,0 \cdot 10^3$	$6,75 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,88 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^4$	$3,69 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^4$

Определим критерий обеспечения скрытности следующим образом [28]: скрытность работы РЛС считается обеспеченной, если текущее отношение сигнал/помеха на выходе когерентной части приемника РТР равно единице, то есть

$$\gamma_{pr.rtr} = 1 \quad (3)$$

В соответствии с критерием, а также с учетом соотношений (1), (2) при отсутствии внешних помех скрытность по главному и боковым лепесткам ДНА РЛС обеспечивается при выполнении неравенств:

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

$$P_0 G_{im} \eta_{im} K_{SF} \leq \frac{(4\pi)^2 r_i^2}{\lambda^2 G_{pr.rtr} F_z^2(h_a, h_t, r_t)} N_{0rtr} \Delta f_{pr.rtr} \quad (5)$$

3. Обоснование и формулировка требований к времени когерентного накопления

Приведенные в таблицах результаты позволяют внести количественную определенность при формировании требований к мощности зондирующего сигнала (ЗС) РЛС и показывают следующее:

- современные цифровые приемники РТР 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 $P_{0\max}$, при которой РЛС не обнаруживается, увеличивается прямо пропорционально увеличению ширины спектра ЗС и обратно пропорционально коэффициенту усиления и уровню боковых лепестков антенны РЛС.

Выражения (3),(4) с учетом затухания при распространении позволяют осуществлять оптимизацию мощности ЗС РЛС в процессе работы для исключения РТР по боковым лепесткам ДНА, а также накладывают ограничения на пиковую мощность ЗС при проектировании РЛС. Кроме того, соотношения (3) и (4) позволяют определить значение $P_{0\max}$, с использованием которого можно сформулировать требование к времени когерентного накопления [2]:

$$T_{kn} \geq \frac{p_{tr} K_{p\Sigma}}{\sigma_s^2 K_s(V_r) F_Z^4(\varepsilon) T_0 \Delta f_0} \frac{T_r}{T_0 \Delta f_0} \left(N_0 \Delta f_0 + \frac{\sigma_{mos}^2}{v_{ls}} + \frac{\sigma_{mov}^2}{v_{lv}} \right) \quad (6)$$

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 - спектральная плотность внутренних шумов приемника РЛС; $K_s(V_r)$ - коэффициент преобразования отраженного сигнала по мощности в устройстве когерентной компенсации МО, зависящий от радиальной скорости цели V_r ; $K_{p\Sigma}$ - 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 .

Для упрощения анализа (6), 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 (6) преобразуется к виду [2,3]:

$$T_{kn} \geq \frac{p_{tr} K_{p\Sigma} T_r}{\sigma_s^2 F_z^4(\varepsilon) T_0} 3N_0 \quad (7)$$

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. 3 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 $k_{sh} = 10$, $F_z(\varepsilon) = 0.5$, $\sigma_1 = 1\text{м}^2$. Мощность ЗС взята из табл. 2 для $\Delta\theta_1 = 2^0$, а требуемое отношение сигнал/помеха было зафиксировано равным $p_{tr} = 100$.

Таблица.3.

Требуемое время когерентного накопления

Δf_0 , МГц	Дальность цели, км						
	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

Заключение

Таким образом, результаты приведенных расчетов позволяют сделать следующие выводы.

1. Скрытность работы РЛС может повышаться путем увеличения времени когерентного накопления при использовании сложных зондирующих сигналов. 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.

2. 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 [7].

3. 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. Быстров Р. П., Вдовин В. А., Дмитриев В. Г., Меньшиков В. Л., Пожидаев В. Н., Перунов Ю. М. , Черепенин В. А.. Оценка потенциальных возможностей и помехозащищенности радиолокационных систем в условиях радиоэлектронного противодействия. // «Журнал радиоэлектроники», 2015, №8, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. – 21 с.

2. Быстров Р.П., Дмитриев В.Г., Меньшиков В.Л., Перунов Ю.М., Потапов А.А. Теоретическая оценка современных методов и способов снижения заметности объектов и радиолокационных систем в условиях

радиоэлектронного противодействия //Нелинейный мир, Изд.-во «Радиотехника», № 6, 2015.

3. Фролов О.П. Антенны и фидерные тракты для радиорелейных линий связи -М.: Радио и связь, 2001. 416с.

4. Борзов А.Б., Быстров Р. П., Меньшиков В. Л., Пожидаев В. Н., Сучков В. Б, Черепенин В. А.. Взаимодействие электромагнитного поля и физических объектов в проблеме функционирования радиолокационных систем в условиях естественных и преднамеренных помех// «Журнал радиоэлектроники». 2015. №8. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 32 с.

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

6. Анкудинов К.А., Меньшиков В.Л. О решении проблемы помехоустойчивости РЛС // Изв. Тульского ГУ, серия “Радиотехника и радиооптика “. -Тула.-2006.-С.19-23.

7. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория // Справочник под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «Маквис», 1998. – 825 с.

Ссылка на статью:

Р.П.Быстров, Н.С.Акиншин, В.Л.Меньшиков. О критерии обеспечения скрытности работы РЛС пассивными методами. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/4/text.pdf>