

УДК 621.396.96

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА**

С.Р. ГЕЙСТЕР, А.В. КУРЕНЕВ

*Военная академия Республики Беларусь  
ул. Гуртьева, 1, Минск, 220057, Беларусь**Поступила в редакцию 27 октября 2006*

Описывается общий подход к выбору типа зондирующего сигнала в радиолокационной системе. Представляется оригинальная методика определения параметров зондирующего сигнала, которая учитывает тактические и технические требования, предъявляемые к радиолокационной системе и ее основным устройствам.

*Ключевые слова:* радиолокационная система, зондирующий сигнал.

**Введение**

Основной проблемой при выборе типа и определении параметров зондирующего сигнала (ЗС) является наличие сложных взаимосвязей этих компонентов между собой. Успешным является разделение процесса решения этой проблемы на этапы, каждый из которых направлен на определение тех или иных параметров ЗС: этап 1 — выбор типа ЗС и определение длины волны; этап 2 — определение параметров ЗС; этап 3 — определение алгоритмов междупериодного управления параметрами ЗС; этап 4 — определение алгоритмов межпачечного управления параметрами ЗС. В данной работе рассматривается методика решения задачи этапа 2, обеспечивающая определение основных параметров одиночных ЗС.

**Общая характеристика методики определения параметров зондирующего сигнала**

Задача определения параметров одиночных ЗС, к которым относятся длительность импульса  $T_0$ , закон модуляции, ширина спектра  $\Delta f_0$ , импульсная (пиковая) мощность  $P_0$  и время наблюдения объекта  $T_N$  [1], определяемое параметрами обзора по угловым координатам и диаграммой направленности антенны (ДНА), является сравнительно сложной и не всегда имеет однозначное решение. В качестве примера рассмотрим вначале один из элементов методики — *выбор ширины спектра закона модуляции  $\Delta f_0$  одиночного ЗС*. Эта величина может быть определена следующим образом:

в задаче обнаружения, исходя из требования к разрешающей способности по дальности  $\Delta r_{tr}=c/(2\Delta f_0)$ , где  $c$  — скорость распространения электромагнитных волн;

в задаче измерения, исходя из требований к ошибкам измерения дальности, которые определяются разрешающей способностью по дальности  $\Delta r_{tr}$ ;

в задаче распознавания по дальномерному радиолокационному портрету (РЛП), исходя из требования к разрешающей способности  $\Delta r_{tr}$ , которое определяется размерами распознаваемых объектов.

Кроме того, при определении величины дополнительно  $\Delta f_0$  учитываются:

требования по помехозащищенности с учетом того, что коэффициент сжатия сигнала при внутрипериодной обработке определяется базой ЗС, т.е.  $B_{zs} = T_0 \Delta f_0$ ;

требования обеспечения скрытности работы радиолокационной системы (РЛС).

Этот короткий пример показывает, что наиболее целесообразно определять ширину спектра  $\Delta f_0$  для каждой из трех задач радиолокации отдельно по мере их решения в РЛС, учитывая при этом требования по помехозащищенности.

При решении задачи обзора пространства преваляющим фактором является необходимость снижения числа элементов разрешения по дальности, так как именно число элементов разрешения  $m_r = r_{obz} / \Delta r_{tr}$  существенно влияет на характеристики обнаружения, где  $r_{obz}$  — интервал обзора по дальности, значение которого связано с интервалом однозначного измерения дальности. Поэтому на практике при решении задачи обзора ширина спектра ЗС выбирается исходя из того, что разрешающая способность должна удовлетворять условию  $\Delta r_{tr} \geq (3-6)L_{t\max}$ , где максимальный радиальный размер объектов  $L_{t\max} \cong 50$  м. Соответственно ширина спектра закона модуляции ЗС при обзоре выбирается из условия  $\Delta f_0 \leq (c / (6-12)L_{t\max})$ .

При решении задачи слеящего измерения дальности стремление к повышению точности измерения путем уменьшения разрешающей способности  $\Delta r_{tr}$  является разумным до границы, соответствующей радиальному размеру сопровождаемого объекта  $L_t$ . Если же разрешающая способность по дальности  $\Delta r < L_t$ , то на измерение дальности начинают оказывать существенное влияние так называемые "шумы" дальности [4], связанные со случайными перемещениями энергетического центра отраженного сигнала по радиальной протяженности объекта. Если класс сопровождаемого объекта неизвестен, то можно использовать среднее значение радиальных размеров  $\bar{L}_t$  и соответственно неравенство вида  $\Delta f_0 \leq (c / 2\bar{L}_t)$ .

При решении задачи распознавания с использованием дальномерного РЛП, характеризующего распределение эффективной отражающей поверхности (ЭОП) объекта вдоль его радиальной протяженности, необходимо обеспечить сверхразрешение объекта по радиальной дальности путем увеличения ширины спектра ЗС. Однако и здесь существуют разумные границы, обусловленные снижением отношения сигнал/помеха в элементе разрешения из-за уменьшения ЭОП фрагментов объекта, попадающих в элементы разрешения. Поэтому в этой задаче целесообразно выбирать ширину спектра исходя из минимальных размеров объектов  $L_{t\min}$  в соответствии с выражением  $\Delta f_0 \cong c / (2L_{t\min})$ .

В заключение по вопросу определения ширины спектра ЗС необходимо отметить, что увеличение этой ширины влечет за собой необходимость использования сложных сигналов, имеющих боковые лепестки автокорреляционной функции закона модуляции. Уровень этих боковых лепестков влияет на потенциально достижимое значение эффективности когерентной компенсации мешающих отражений от мешающих отражателей, скорость перемещения которых по радиальной дальности изменяется в пределах величины, соответствующей удвоенной длительности импульса. Такими отражателями на практике являются объемно распределенные облака дипольных отражателей и гидрометеоров, а также водная поверхность. С другой стороны, защищенность РЛС от активных помех при использовании сложных законов модуляции улучшается в результате повышения скрытности работы РЛС. Следовательно, использование сложных законов модуляции ЗС предполагает анализ наличия мешающих отражений и активных помех в тех или иных угловых секторах зоны обзора и адаптивное к помеховой обстановке управление параметрами закона модуляции ЗС.

Важно отметить, что при выборе параметров ЗС необходимо учитывать основные тактико-технические требования к РЛС:

необходимо обеспечить обнаружение цели с заданной ЭОП  $\sigma_r$  на требуемой дальности  $r_{tr}$  с вероятностью правильного обнаружения  $D$  не менее требуемой  $D_{tr}$  при вероятности ложных тревог (числе ложных тревог) в зоне обзора за один период обзора  $F_m$  не более требуемой  $F_{mtr}$ ;

необходимо обеспечить требуемые разрешающие способности по дальности  $\Delta r_{tr} = c/(2\Delta f_0)$  (определяется величиной  $\Delta f_0$ ), по угловым координатам  $\Delta\theta_{tr} \cong \lambda/L_{a\text{eff}}$  (определяется эффективными размерами  $L_{a\text{eff}}$  антенной системы и длиной волны  $\lambda$ ), по скорости  $\Delta V_{tr} \cong \lambda/(2T_{kn})$  (определяется временем когерентного накопления  $T_{kn}$  или наблюдения  $T_N$ , а также длиной волны);

необходимо выбрать параметры ЗС таким образом, чтобы импульсная мощность ЗС  $P_0$  удовлетворяла условию  $P_0 \leq P_{0S}$ , где  $P_{0S}$  — ограничительное значение импульсной мощности.

### Этапы методики определения параметров зондирующего сигнала

С учетом сформулированных замечаний *обобщенная методика выбора параметров одиночного ЗС* предусматривает следующие этапы.

**Этап 1.** Осуществляется выбор типа ЗС (импульсный, квазинепрерывный или непрерывный), определение основной частоты повторения  $F_{r0}$  (основного периода повторения  $T_{r0}$ ) и длины волны по методике, разработанной в [2,3].

**Этап 2.** С использованием значений частоты повторения  $F_{r0}$ , требуемой дальности обнаружения и скоростей целей по методике, разработанной в [2,3], определяются минимально необходимое для режима обнаружения число  $l_{pp}$  и значения дополнительных частот повторения  $F_{r,l}$ ,  $l = \overline{1, l_{pp}}$ , или дополнительных периодов повторения ЗС для устранения "слепых" скоростей и (или) "слепых" дальностей. При необходимости на этом этапе определяются значения  $l_{NM}$  частот повторения для устранения нониусным методом неоднозначности в измерении радиальной дальности или скорости.

**Этап 3.** Определяется значение требуемой минимальной ширины спектра закона модуляции одиночного зондирующего сигнала  $\Delta f_{0\text{min}} = c/(2\Delta r_{tr})$ , где  $\Delta r_{tr}$  — требуемая разрешающая способность по дальности, зависящая от решаемой задачи (обнаружение, распознавание, измерение).

**Этап 4.** Осуществляется оценка времени наблюдения цели  $T_N^*$ . Знание времени наблюдения необходимо для определения времени контакта с целью и соотношения интервалов когерентного и некогерентного накопления, причем в условиях помех целесообразно осуществлять когерентное накопление в течение всего интервала наблюдения. Наиболее сложным является оценивание времени наблюдения  $T_N^*$  в режиме обзора. Обозначив требуемые размеры сектора обзора по угловым координатам как  $\varepsilon_{obz}$ ,  $\beta_{obz}$ , а требуемое время обзора как  $T_{obz}$ , можно получить следующие варианты оценивания времени наблюдения: при последовательном обзоре по обоим угловым координатам  $T_N^* = T_{obz}/(m_\varepsilon m_\beta l_{pp})$ , а при одновременном обзоре по углу места и последовательном обзоре по азимуту  $T_N^* = T_{obz}/(m_\varepsilon l_{pp})$ , где  $m_\varepsilon = \varepsilon_{obz}/\Delta\varepsilon$ ,  $m_\beta = \beta_{obz}/\Delta\beta$  — число элементов разрешения по азимуту и углу места в зоне обзора;  $\Delta\varepsilon$ ,  $\Delta\beta$  — разрешающие способности по углу места и азимуту, которые задаются в требованиях к РЛС или определяются исходя из требуемых ошибок измерения.

Необходимо отметить, что выбор способа обзора пространства по угловым координатам и соответственно времени наблюдения является итеративным процессом, и после определения структур обнаружителя и измерителей РЛС время  $T_N^*$  может уточняться.

**Эман 5.** Определяется максимальное число  $m_{\max}$  элементов разрешения в зоне обзора и требуемое значение вероятности ложных тревог  $F_{lr}$  в одном элементе разрешения за один цикл обзора. В общем случае  $m_{\max} = m_r m_p m_e m_{v\max}$ , а  $F_{lr} \cong F_{m\ tr} / m_{\max}$ , где  $m_r = r_{odn} / \Delta r_{lr} = cT_{r0} / 2\Delta r_{lr}$  — число просматриваемых элементов разрешения в интервале однозначного измерения дальности  $r_{odn}$ ;  $m_{v\max} = V_{r\ odn} / \Delta V_{\min} = F_{r0} T_N^*$  — оценка максимального числа просматриваемых элементов разрешения по скорости в интервале однозначного измерения скорости  $V_{r\ odn} = 0,5F_{r0}\lambda$  при минимальном значении разрешения по скорости  $\Delta V_{\min} = F_{r0}\lambda / (2T_N^*)$ .

**Эман 6.** Осуществляется расчет требуемого отношения сигнал/помеха  $\rho_{lr} = \rho(D_{lr}, F_{lr})$  на выходе устройства когерентной обработки принятого сигнала с учетом выбранной структуры обнаружителя, при котором обеспечиваются требуемые вероятности правильного обнаружения  $D = D_{lr}$  и ложных тревог  $F_m = F_{m\ tr}$  в зоне обзора, а также потенциальной эффективности когерентного накопления  $\upsilon_{II}^* \cong F_{r0} T_N^* = L_{KN}^*$  (при когерентном накоплении на всем интервале наблюдения) или эффективности некогерентного накопления  $\upsilon_{NN}^* \cong F_{r0} T_H^* = L_{NN}^*$  (при некогерентном накоплении на всем интервале наблюдения).

**Эман 7.** Осуществляется предварительное определение суммарного коэффициента потерь  $K_{p\Sigma}$  полезного сигнала [2] в приемопередающем тракте и на трассе распространения.

**Эман 8.** Осуществляется определение требуемой энергии временной структуры одиночного ЗС  $\mathcal{E}_{lr}^i = P_0 T_0$  в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{lr}^i &= \rho(D_{lr}, F_{lr}) F_z^{-4}(h_a, h_t, r_i) K_{p\Sigma} \left( N_0 + \frac{N_{abok}}{\upsilon_{akp}} + \frac{\sigma_{mo}^2}{\Delta f_0 \upsilon_I} \right) \frac{\Delta F_{II}}{F_{r0}} \frac{(4\pi)^3 r_{lr}^4}{G_{lr} G_{rs} \lambda^2 \sigma_t} = \\ &= \rho(D_{lr}, F_{lr}) F_z^{-4}(h_a, h_t, r_i) K_{p\Sigma} \left( (K_{o-mo} + 1) N_0 + \frac{N_{abok}}{\upsilon_{akp}} \right) \frac{\Delta F_{II}}{F_{r0}} \frac{(4\pi)^3 r_{lr}^4}{G_{lr} G_{rs} \lambda^2 \sigma_t}, \end{aligned}$$

а также требуемой энергии пространственно-временной структуры одиночного ЗС  $\mathcal{E}_{lr}^p = P_0 T_0 G_{lr} G_{rs}$ :

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{lr}^p &= \rho(D_{lr}, F_{lr}) F_z^{-4}(h_a, h_t, r_i) K_{p\Sigma} \left( N_0 + \frac{N_{abok}}{\upsilon_{akp}} + \frac{\sigma_{mo}^2}{\Delta f_0 \upsilon_I} \right) \frac{\Delta F_{II}}{F_{r0}} \frac{(4\pi)^3 r_{lr}^4}{\lambda^2 \sigma_t} = \\ &= \rho(D_{lr}, F_{lr}) F_z^{-4}(h_a, h_t, r_i) K_{p\Sigma} \left( (K_{o-mo} + 1) N_0 + \frac{N_{abok}}{\upsilon_{akp}} \right) \frac{\Delta F_{II}}{F_{r0}} \frac{(4\pi)^3 r_{lr}^4}{\lambda^2 \sigma_t}, \end{aligned}$$

где  $K_{o-mo} = \sigma_{mo}^2 / (\Delta f_0 \upsilon_I N_0)$  — относительный уровень спектральной плотности остатков мешающих отражений после когерентной компенсации, нормированных к спектральной плотности собственных шумов приемного устройства  $N_0$  (в первом приближении  $K_{o-mo} = 2$ );  $F_z(h_a, h_t, r_i)$  — интерференционный множитель земли;  $N_{abok}$ ,  $\upsilon_{akp}$  — спектральная плотность и эффективность пространственной когерентной компенсации активных шумовых помех, принимаемых по боковым лепесткам диаграммы направленности РЛС;  $\sigma_{mo}^2$ ,  $\upsilon_I$  — мощность и эффективность когерентной компенсации мешающих отражений;  $G_{lr}$ ,  $G_{rs}$  — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн;  $\Delta F_{II}$  — ширина зубца амплитудно-частотной характеристики когерентного накопителя [1].

**Этап 9.** Осуществляется определение требуемой средней мощности зондирующего сигнала. При этом целесообразно рассматривать два варианта: требуемую среднюю мощность временной структуры ЗС  $P_0$ , использование которой предполагает знание параметров антенны, а также требуемую среднюю мощность пространственно-временной структуры ЗС  $P_{S\ tr}^P = P_0 T_0 G_{tr} G_{rs} / T_{r0}$ , использование которой позволяет перераспределять энергопотенциал между радиопередающим устройством (РПУ) и антенной РЛС.

Требуемая средняя мощность временной структуры ЗС рассчитывается как  $P_{S\ tr} = \mathcal{E}'_{tr} / T_{r0}$ . Величина  $P_{S\ tr}$  используется для выбора оконечных приборов РПУ и должна быть меньше максимальной средней мощности  $P_{S\ max}$  для предполагаемых к использованию выходных приборов РПУ. Если условие  $P_{S\ tr} \leq P_{S\ max}$  не выполняется, то для снижения  $P_{S\ tr}$  можно предпринять снижение уровней боковых лепестков антенн, увеличение времени наблюдения путем изменения способа обзора, повышение эффективности когерентной компенсации мешающих отражений, если их остатки превышают требуемый уровень, или выбор других усилительных приборов с большим значением  $P_{S\ max}$ .

**Этап 10.** На данном этапе осуществляется определение параметров одиночного зондирующего сигнала — длительности  $T_0$ , импульсной мощности  $P_0$  и закона внутриимпульсной модуляции. Импульсная мощность  $P_0$  находится из соотношения  $P_0 = \mathcal{E}'_{tr} / T_0$ .

Выбор длительности  $T_0$  одиночного ЗС осуществляется с учетом того, что ширина его спектра должна удовлетворять условию  $\Delta f_0 \geq c / (2\Delta r_r)$ . Если к РЛС не предъявляются специальные требования, то проверяется возможность использования простых прямоугольных радиоимпульсов (ППРИ). При этом, исходя из соотношения  $T_0 = 1 / \Delta f_{0\ min}$ , выбирается длительность ППРИ  $T_0$ , а затем определяется его импульсная мощность  $P_0 = \mathcal{E}'_{tr} / T_0$ . Значение  $P_0$  сопоставляется с максимальной пиковой мощностью  $P_{0\ max}$  предполагаемых для использования выходных усилительных (генераторных) приборов. Если неравенство  $P_0 \leq P_{0\ max}$  выполняется, то использование ППРИ возможно. В случае невыполнения этого неравенства, длительность одиночного импульса определяется как  $T_0 = \mathcal{E}'_{tr} / P_{0\ max}$ , а затем осуществляется выбор закона фазочастотной внутриимпульсной модуляции.

### Заключение

Представленная методика позволяет обеспечить решение сравнительно сложной задачи выбора параметров зондирующего сигнала для радиолокаторов различного назначения. Методика позволяет учесть основные тактические и технические требования к различным радиолокаторам и разрешить противоречия, возникающие в ходе учета этих требований для режимов обзора, измерения координат и распознавания объектов наблюдения.

# TECHNIQUE OF DEFINING THE PARAMETERS OF A RADAR PROBING SIGNAL

S.R. GEYSTER, A.V. KURENEV

## Abstract

The general approach to the choice of a probing signal in radar system is described. A new technique of defining the parameters of a probing signal which takes into account tactical and technical requirements to radar system and its basic devices is represented.

## Литература

1. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. М., 1983, Ч. 1.
2. *Гейстер С.Р.* Системное проектирование и расчет радиолокаторов противовоздушной обороны. Минск., 1999. Ч.1.
3. *Гейстер С.Р.* Адаптивное обнаружение-распознавание с селекцией помех по спектральным портретам. Минск., 2000.
4. *Сколник М.* Справочник по радиолокации. М., 1976. Т. 1.