

В. А. Пахотин, С. В. Молостова

МЕТОД ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДАЛЬНОСТИ ДО ЦЕЛИ

На основе метода максимального правдоподобия рассмотрены потенциальные возможности обработки локационного сигнала при приближении цели к локатору. Показано, что с возрастанием отношения «сигнал/шум» существенно увеличивается точность оценок параметров сигнала и улучшается разрешение близких целей по дальности.

On the basis of a method of the maximal credibility considers questions limiting accuracy parameters of a signal and the sanction on range at approach of the purpose a locator. It is shown, that due to increase of the attitude the signal/noise essentially increases an opportunity of the sanction of the radio impulses reflected from the purpose. The supersanction on range is provided with a method of the maximal credibility.

Ключевые слова: дисперсия параметров сигнала, максимальная дальность обнаружения цели, вероятность правильного обнаружения.

Key words: dispersion of parameters of a signal, the maximum range of detection of the purpose, probability of correct detection.

Введение

Теория оптимального приема в приложении к системам локации позволяет определить алгоритм обработки, получить оптимальные оценки параметров сигнала и оценки их дисперсий [1–3] и обеспечить высокое разрешение целей по дальности. В работе [4] показано, что разрешение целей по дальности в системах локации зависит от отношения «сигнал/шум» на выходе из блока усилителя промежуточной частоты и от количества некоррелированных по шуму отсчетов. Это позволяет рассмотреть вопрос о потенциальных возможностях обработки локационных сигналов в зависимости от расстояния до цели. При приближении цели к точке приема амплитуда сигнала увеличивается обратно пропорционально квадрату расстояния до нее. Следовательно, увеличивается и отношение «сигнал/шум», а вместе с ним повышается точность оценок параметров локационного сигнала и улучшается разрешение целей по дальности. В настоящей статье рассмотрена теория данного вопроса и приведен ряд модельных расчетов, иллюстрирующих количественные характеристики при заданных параметрах локационного сигнала.

Основные теоретические положения

Определим дисперсию оценок параметров сигнала: времени приема, амплитуды, начальной фазы. Выражения для дисперсии Рао – Крамера находятся по второй производной информационной матрицы Фишера в точке решения при $t'_0 = t_0$. Для времени приема радиоимпульса дисперсия определена выражением

$$D_{t_0} = \frac{\sigma^2}{(U^2 N \omega^2)}. \quad (1)$$

Она зависит от отношения «сигнал/шум» U^2/σ^2 , количества некоррелированных по шуму отсчетов N и от квадрата частоты ω^2 . Зависимость от квадрата частоты определена тем, что при увеличении частоты радиус кривизны косинусной составляющей КФ точки максимума уменьшается, а следовательно, должна уменьшаться и дисперсия.

Наряду с (1) существует и оценка дисперсии времени приема радиоимпульса, оцениваемая по формуле Вудворда [1]. Для радиоимпульса она имеет вид

$$D_{t_0} = \frac{\sigma^2 T^2}{[U^2 N (2\pi)^2]}. \quad (2)$$

Формула Вудворда определяет дисперсию t_0 по огибающей радиоимпульса и часто используется на практике.

Зависимости дисперсий времени приема радиоимпульса (1) и (2) существенно различаются. Согласно формуле Вудворда, чтобы понизить дисперсию, следует сократить длительность радиоимпульсов T . В соответствии с формулой Рао – Крамера (1) дисперсия D_{t_0} не зависит от длительности радиоимпульса и может быть уменьшена при увеличении частоты. Таким образом, возникает вопрос о соответствии дисперсии времени приема отраженного от цели радиоимпульса дисперсии Рао – Крамера (1) или дисперсии Вудворда (2).

Для остальных параметров радиоимпульса – амплитуды U и фазы φ_0 – дисперсии определяются выражениями [1; 2]

$$D_{U_0} = \frac{\sigma^2}{N}, D_{\varphi_0} = \frac{\sigma^2}{(U^2 N)}. \quad (3)$$

Дисперсия фазы тесно связана с дисперсией времени приема D_{t_0} . Вследствие этого дисперсия фазы, определенная по алгоритму, не соответствует дисперсии D_φ согласно (3). Она гораздо больше.

Оценка зависимости дисперсии параметров сигнала от расстояния до цели

Рассмотрим вопрос об изменении дисперсии параметров принимаемого радиоимпульса в зависимости от дальности до цели на основе модели Рао – Крамера (1). Согласно формуле локации [3], амплитуда принятого радиоимпульса

$$U^2 = \frac{KU_{изл}^2 S_0}{2L^4}, \quad (4)$$

где K – коэффициент, задающий технические параметры антенных устройств; $U_{изл}$ – амплитуда излученного локатором радиоимпульса; S_0 – эффективная площадь рассеяния цели; L – дальность до цели.

Вероятность обнаружения цели определяется выражением [1]

$$P_{обн} = 1 - \Phi\left(-\frac{U\sqrt{N}}{2\sigma}\right), \quad (5)$$

где Φ^* – функция ошибок.

Согласно (5), для обнаружения цели с вероятностью $P_{обн}$ требуется амплитуда сигнала

$$U = \left(\frac{2\sigma}{\sqrt{N}}\right) \Phi^{-1}(1 - P_{обн}), \quad (6)$$

где Φ^{-1} – функция, обратная функции ошибок.

Подставив (6) в (4), получим максимальную (потенциальную) дальность работы импульсного локатора для фиксированного значения $P_{обн}$

$$L_{max} = \sqrt[4]{\frac{KU_{изл}^2 NS_0}{8\sigma^2 [\Phi^{-1}(1 - P_{обн})]^2}}. \quad (7)$$

Амплитуда излученного радиоимпульса $U_{изл}$ зависит от электрической прочности антенных систем и практически не может быть изменена. Дисперсия шума σ^2 в точке приема определяется тепловыми шумами антенной системы и шумами входных каскадов приемника и также может считаться постоянной величиной. Длительность радиоимпульса T выбирается исходя из требований к разрешению по дальности. Поэтому, как следует из (7), максимальная дальность действия локатора с точки зрения обработки зависит в первую очередь от количества некоррелированных по шуму отсчетов, которое определяется отношением полосы пропускания блока УПЧ $\Delta f_{пр}$ и ширины спектра сигнала Δf_c : $N = \Delta f_{пр} / \Delta f_c$. Для радиоимпульса это соотношение записывается в форме $N = T / \Delta t_k$, где Δt_k – интервал корреляции шума на выходе блока УПЧ. Поэтому максимальная дальность действия локатора определяется интервалом корреляции по шуму Δt_k , а следовательно, и $\Delta f_{пр}$.

Рассмотрим возможности уменьшения дисперсий параметров при уменьшении расстояния до цели. Пусть локационная станция обеспечивает дисперсии параметров D_{U_0} , D_{φ_0} , D_{t_0} на

максимальной дальности действия локатора. В соответствии с (4) амплитуда радиоимпульса зависит от дальности:

$$\frac{U}{U_0} = \left(\frac{L_{\max}}{L} \right)^2, \quad (8)$$

где U_0 – амплитуда принятого радиоимпульса при максимальной дальности действия локатора.

Обращает на себя внимание независимость дисперсии амплитуды от ее значения, а значит, и от расстояния до цели.

На основе зависимости (8) можно получить идентичные соотношения для дисперсий времени приема и начальной фазы радиоимпульса:

$$\frac{D_\varphi}{D_{\varphi_0}} = \left(\frac{L}{L_{\max}} \right)^4, \quad \frac{D_t}{D_{t_0}} = \left(\frac{L}{L_{\max}} \right)^4.$$

Данная зависимость показана на рисунке 1. Как видно из рисунка, уменьшение относительной дальности до 0,8 снижает относительную дисперсию до 0,4. Таким образом, при приближении цели к локатору дисперсии оцениваемых параметров понижаются.

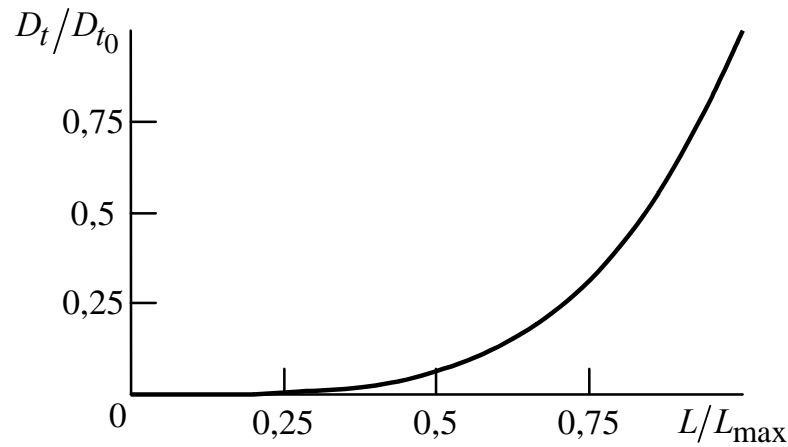


Рис. 1

Для случая приема радиоимпульсов, отраженных от двух близких по дальности целей, выражения для оценок Рао – Крамера дисперсий параметров принимаемых радиоимпульсов определены в [4]:

$$\begin{aligned} D_{U_1} = D_{U_2} &= \frac{\sigma^2}{N(1-|\hat{R}|^2)}, \quad D_{\varphi_1} = \frac{\sigma^2}{U_1^2 N(1-|\hat{R}|^2)}, \quad D_{\varphi_2} = \frac{\sigma^2}{U_2^2 N(1-|\hat{R}|^2)}, \\ D_{t_1} &= \frac{\sigma^2}{U_1^2 N \omega^2 (1-|\hat{R}|^2)}, \quad D_{t_2} = \frac{\sigma^2}{U_2^2 N \omega^2 (1-|\hat{R}|^2)}, \end{aligned} \quad (9)$$

где D_{U_1}, D_{U_2} – дисперсии амплитуд принятых радиоимпульсов; \hat{R} – комплексный коэффициент корреляции двух радиоимпульсов; $D_{\varphi_1}, D_{\varphi_2}, D_{t_1}, D_{t_2}$ – дисперсии начальных фаз и времен приема принятых радиоимпульсов соответственно; U_1, U_2 – амплитуды принятых радиоимпульсов.

Значения, даваемые выражениями (9), подтвердились результатами модельных расчетов и могут быть приняты в качестве основы при рассмотрении зависимости дисперсий параметров радиоимпульсов от расстояния до цели. Дисперсия шума σ^2 и другие параметры сигнала остаются постоянными при изменении дальности, а амплитуда радиоимпульсов изменяется достаточно значительно. Следовательно, возможно увеличить разрешающую способность за счет разделения радиоимпульсов при их частичном наложении во времени, когда коэффициент корреляции отличен от нулевого значения. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Пусть в локационной системе разрешающая способность при максимальной дальности определяется длительностью радиоимпульсов T при отсутствии корреляции между импульсами ($|\hat{R}|=0$). С сокращением расстояния до цели из-за увеличения амплитуд U_1, U_2 дисперсии параметров уменьшаются. Однако если принять сохранение дисперсий постоянными, можно допустить соответствующее повышение коэффициента корреляции. В результате получаем зависимость коэффициента корреляции от относительной дальности:

$$|\hat{R}| = 1 - \frac{|\tau|}{T} = \sqrt{1 - \left(\frac{L}{L_{\max}}\right)^4} \quad \text{или} \quad \frac{|\tau|}{T} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{L}{L_{\max}}\right)^4},$$

где τ – разность времени приема двух радиоимпульсов.

Последняя зависимость приведена на рисунке 2. Как следует из рисунка, уменьшение относительного расстояния до 0,4 приводит к значению $\tau \sim 1$ мкс при длительности радиоимпульса $T=80$ мкс. В этом случае будут разрешены радиоимпульсы, отличающиеся по времени приема на $\Delta t=1$ мкс. Таким образом, высокое отношение «сигнал/шум», реализующееся в области малых расстояний до цели, может быть использовано для увеличения разрешающей способности импульсного радиолокатора.

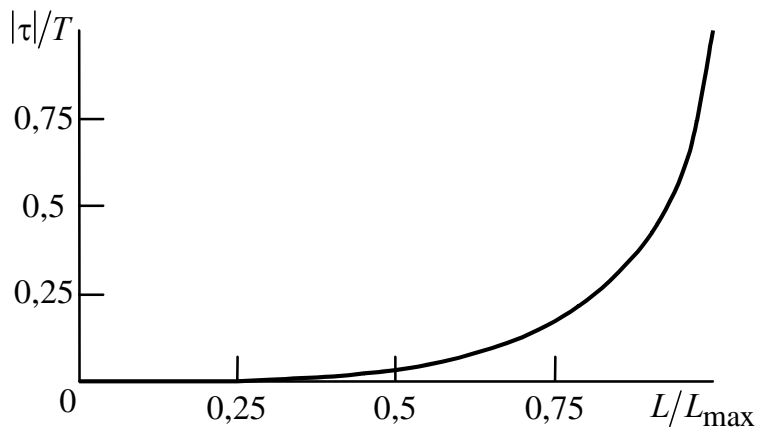


Рис. 2

Результаты модельных исследований

В таблицах 1 и 2 представлен ряд результатов модельных исследований зависимости разрешающей способности и дисперсий параметров сигнала, состоящего из двух радиоимпульсов с частичным наложением во времени, от дальности до цели. При моделировании приняты следующие значения параметров: амплитуды радиоимпульсов $U_1=1, U_2=0,9$, начальные фазы $\varphi_{01}=50^\circ, \varphi_{02}=0^\circ$, частота $\omega_0=2\pi f, f=200$ кГц длительности радиоимпульсов $T=40$ мкс, интервал между отсчетами $\Delta t=1$ мкс, дисперсия шума $\sigma^2=0,64$, времена приема радиоимпульсов $t_{01}=20$ мкс, $t_{02}=50$ мкс, $N=40$.

Перекрытие радиоимпульсов во времени составило 10 мкс при их длительности $T=40$ мкс. Коэффициент корреляции между радиоимпульсами $R=0,25$, отношение «сигнал/шум» на выходе блока УПЧ равно 2,3 дБ. Оценка вероятности правильного обнаружения для радиоимпульса с амплитудой U_1 равна 0,97, а для радиоимпульса с амплитудой U_2 – 0,955. В результате обработки сорока отсчетов отношение «сигнал/шум» возросло до 18,5 дБ, разрешающая способность $A=T/\tau=1,33$. В таблице 1 представлены средние значения величин t_{01}, t_{02}, U_1, U_2 и их СКО $\sigma_{t_{01}}, \sigma_{t_{02}}, \sigma_{U_1}, \sigma_{U_2}$.

Таблица 1

Параметр	Значение	Среднеквадратичное
----------	----------	--------------------

сигнала	среднее	модельное	отклонение
t_{01} , мкс	21,6	20	3,65
t_{02} , мкс	46,2	50	4,14
U_1	0,96	1	0,14
U_2	0,86	0,9	0,16

Если уменьшить расстояние вдвое, то амплитуды радиоимпульсов возрастут в $\sqrt{2}$ раз. В результате увеличатся точность оценки параметров сигналов и вероятности их обнаружения. В таблице 2 приведены средние значения и среднеквадратичные отклонения параметров сигнала. Как следует из нее, СКО времен приема уменьшились, а СКО амплитуд практически не изменились.

Таблица 2

Параметр сигнала	Значение		Среднеквадратичное отклонение
	среднее	модельное	
t_{01} , мкс	20,37	20	3,24
t_{02} , мкс	47,62	50	3,52
U_1	1,36	1,4	0,15
U_2	1,23	1,27	0,155

Заключение

Таким образом, результаты модельных расчетов подтверждают положения теории и показывают возможность увеличения разрешающей способности по дальности в системах импульсной локации при уменьшении расстояния до цели.

Список литературы

1. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем: учеб. пособие для вузов. М., 2003.
2. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М., 1983.
3. Бакулев П. А. Радиолокационные системы: учебник для вузов. М., 2004.
4. Власова К.В., Пахотин В.А. и др. Решение задачи разрешения по дальности в локации методом максимального правдоподобия // Изв. вузов России. Радиотехника. 2010. Вып. 1. С. 58 – 65.

Об авторах

В. А. Пахотин – д-р физ.-мат. наук, проф., РГУ им. И. Канта.
С. В. Молостова – канд. физ.-мат. наук, РГУ им. И. Канта.

Authors

V. Pakhotin – Prof., IKSUR.
S. Molostova – Dr., IKSUR.