



УДК 621.391

Г. С. Нахмансон, А. В. Суслин  
 Военно-воздушная академия им. проф.  
 Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (Воронеж)

## Влияние энергетических потерь при обработке фазоманипулированных сигналов на максимальную дальность действия и точность измерения координат в радиолокационных системах

*Рассмотрено ухудшение максимальной дальности действия и точности измерения дальности и угловых координат целей за счет энергетических потерь, возникающих при обработке фазоманипулированных радиосигналов. Показана возможность уменьшения указанных потерь при использовании фазоманипулированных сигналов с плавным изменением фазы между элементарными импульсами.*

**Радиолокационная система, фазоманипулированный сигнал, энергетические потери, плавное изменение фазы, максимальная дальность действия, точность измерения дальности, точность измерения угловых координат**

Одними из основных характеристик радиолокационных систем (РЛС) являются максимальная дальность действия (МДД) и точности измерения дальности и угловых координат воздушного судна (ВС) [1]–[3]. В силу энергетических потерь, обусловленных различными факторами, реальная МДД и точность измерения координат РЛС могут существенно снижаться по сравнению с требуемыми значениями. Одним из факторов, вызывающих уменьшение МДД РЛС и ухудшение точности измерения координат (ТИК), являются энергетические потери, возникающие при обработке принимаемых сигналов.

В современных РЛС в качестве зондирующих сигналов широко применяются фазоманипулированные радиосигналы (ФМРС) [1], [2]:

$$s(t) = \operatorname{Re}[U(t)\exp(j\omega_0 t)], \quad (1)$$

где

$$U(t) = \sum_{k=1}^n \left\{ p_k \operatorname{rect} \left[ \frac{t - (k-1)\tau_{\text{и}}}{\tau_{\text{и}}} \right] \right\}$$

– огибающая ФМРС;  $\omega_0 = 2\pi f_0$  ( $f_0$  – несущая частота), причем  $n$  – размер кода или база сигнала (количество импульсов последовательности);  $p_k \in \{-1, 1\}$  – элементы кодовой последовательности, определяющие код модуляции фазы;

$$\operatorname{rect} \left[ \frac{t - (k-1)\tau_{\text{и}}}{\tau_{\text{и}}} \right] = \begin{cases} 1, & (k-1)\tau_{\text{и}} \leq t \leq k\tau_{\text{и}}; \\ 0, & t < (k-1)\tau_{\text{и}}, \quad t > k\tau_{\text{и}} \end{cases}$$

– прямоугольная огибающая элементарного импульса ФМРС;  $\tau_{\text{и}}$  – длительность элементарного импульса.

При обработке ФМРС энергетические потери возникают из-за разрывов в моменты скачкообразного изменения фазы, вызванных тем, что на временном интервале, соответствующем длительности элементарного импульса, укладывается нецелое число периодов несущего колебания [3].

Одним из способов уменьшения таких потерь является использование в ФМРС плавного изменения фазы (ПИФ) между элементарными импульсами [4]. В связи с этим оценка энергетических потерь, возникающих при использовании ПИФ между элементарными импульсами, и влияние фазы на МДД и ТИК РЛС представляют практический интерес.

Цель настоящей статьи – исследовать возможность снижения уменьшения МДД и ТИК РЛС с зондирующими фазоманипулированными радиосигналами за счет использования в них плавного изменения фазы между элементарными импульсами.

**Оценка влияния энергетических потерь при приеме ФМРС на максимальную дальность действия.** МДД РЛС определяется следующим образом [1], [2], [5]:

$$R = \sqrt[4]{A/Q}, \quad (2)$$

где

$$A = \frac{2P_{\text{ср}}T_cGS_a\sigma}{(4\pi)^2 N_0\alpha_{\text{П}}};$$

$$Q = \frac{P_{\text{мин}}n\tau_{\text{и}}}{N_0}$$

– отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума (отношение "сигнал/шум" – ОСШ), при котором обеспечивается обнаружение цели с заданной вероятностью, причем  $P_{\text{ср}}$  – средняя мощность излучения передатчика РЛС;  $T_c = n\tau_{\text{и}}$  – время наблюдения отраженного сигнала;  $G$  – коэффициент направленного действия передающей антенны;  $S_a$  – эффективная площадь приемной антенны;  $\sigma$  – эффективная поверхность отражения (ЭПО) цели;  $N_0$  – спектральная плотность внутренних шумов приемника;  $\alpha_{\text{П}}$  – коэффициент потерь, учитывающий энергетические потери за счет различных факторов;  $P_{\text{мин}}$  – чувствительность приемника, обеспечивающая максимальную дальность РЛС.

Для выделения фактора влияния энергетических потерь при обработке сигналов представим коэффициент потерь в (2) в виде

$$\alpha_{\text{П}} = \alpha_{\text{Э.П}}\alpha_{\text{Ф}}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{\text{Э.П}}$  – коэффициент, учитывающий потери при обработке сигналов;  $\alpha_{\text{Ф}}$  – коэффициент, учитывающий потери, зависящие от воздействия других факторов. Тогда выражение (2) можно представить как

$$R = \sqrt[4]{A_1/(Q\alpha_{\text{Э.П}})}, \quad (4)$$

где

$$A_1 = \frac{2P_{\text{ср}}T_cGS_a\sigma}{(4\pi)^2 N_0\alpha_{\text{Ф}}}$$

Из (4) имеем:

$$R^4 Q \alpha_{\text{Э.П}} = A_1. \quad (5)$$

При отсутствии потерь при обработке ФМРС  $\alpha_{\text{Э.П}} = 1$ . Тогда МДД  $R_0$  и соответствующее ей минимальное ОСШ  $Q_0$  удовлетворяют соотношению

$$R_0^4 Q_0 = A_1. \quad (6)$$

Разделив уравнение (5) на (6), получим:

$$(R/R_0)^4 (Q/Q_0) = 1/\alpha_{\text{Э.П}}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что при сохранении ОСШ постоянным МДД РЛС

$$R = R_0 / \sqrt[4]{\alpha_{\text{Э.П}}},$$

т. е. убывает с увеличением потерь. В частности, при  $\alpha_{\text{Э.П}} = 2, 3$  и  $4$  [1], [2], [5] МДД уменьшается до  $0.84R_0, 0.76R_0$  и  $0.71R_0$  соответственно. Следовательно, для того чтобы МДД при наличии потерь не менялась ( $R = R_0$ ), минимальное (соответствующее чувствительности) ОСШ должно уменьшаться пропорционально  $\alpha_{\text{Э.П}}$ .

Рассмотрим влияние на изменение МДД РЛС применения в ФМРС ПИФ между элементарными импульсами. ПИФ осуществляется изменением несущей частоты  $f_0$  на  $F_{\Omega} = \Omega/(2\pi)$  на интервале  $\Delta\tau = \xi\tau_{\text{и}}$  ( $\xi < 1$ ), причем  $F_{\Omega} = 1/(2\Delta\tau)$ . Комплексная огибающая такого сигнала определяется выражением [4], [6]:

$$U(t) = \sum_{k=1}^n \left\{ p_{k-1} \lambda_k \text{rect} \left[ \frac{t - (k-1)\tau_{\text{и}}}{\Delta\tau} \right] \times \right. \\ \times e^{j\Omega[t - (k-1)\tau_{\text{и}}]} + p_k (1 - \lambda_k) \times \\ \times \text{rect} \left[ \frac{t - (k-1)\tau_{\text{и}}}{\Delta\tau} \right] + \\ \left. + p_k \text{rect} \left[ \frac{t - (k-1)\tau_{\text{и}} - \Delta\tau}{\tau_{\text{и}} - \Delta\tau} \right] \right\}, \quad (8)$$

где  $\lambda_k = \begin{cases} 1, & p_{k-1} \neq p_k; \\ 0, & p_{k-1} = p_k \end{cases}$  – параметр, указывающий

на наличие или отсутствие изменения фазы между  $(k-1)$ -м и  $k$ -м импульсами. При  $\lambda_k = 0$  ( $k = 1, \dots, n$ ) ПИФ отсутствует и выражение (8) переходит в выражение для огибающей (1) для ФМРС со скачкообразным изменением фазы.

Как показано в [6], при приеме ФМРС с ПИФ между элементарными импульсами приемником, рассчитанным на прием ФМРС со скачкообраз-

ным изменением фазы, коэффициент потерь определяется как

$$\alpha_{\text{э.п}} = \left[ \left( 1 - \frac{\xi}{n} \sum_{k=1}^n \lambda_k \right)^2 + \left( \frac{2\xi}{\pi n} \sum_{k=1}^n p_k p_{k-1} \lambda_k \right)^2 \right]^{-0.5} \quad (9)$$

Его значение зависит от базы сигнала и от доли длительности элементарного импульса  $\xi$ , на котором осуществляется плавное изменение фазы.

В современных РЛС широко применяются ФМРС с модуляцией фазы между импульсами по законам кодов Баркера [1]–[3]. Так, для базы ФМРС  $n = 13$  с модуляцией фазы по закону кода Баркера и  $\xi = 0.25$  и  $0.125$  значение коэффициента потерь составляет 1.13 и 1.06 соответственно.

На рис. 1 показаны зависимости  $Q/Q_0$  от отношения  $R/R_0$  при различных значениях параметра  $\alpha_{\text{э.п}}$ . Сплошные кривые отражают потери при приеме ФМРС со скачкообразным изменением фазы между элементарными импульсами, а штриховые кривые – потери при приеме ФМРС с ПИФ на интервалах  $\Delta\tau = 0.125\tau_{\text{и}}$  ( $\alpha_{\text{э.п}} = 1.06$ ) и  $\Delta\tau = 0.25\tau_{\text{и}}$  ( $\alpha_{\text{э.п}} = 1.13$ ).

Из зависимостей на рис. 1 следует, что при отсутствии потерь ( $Q = Q_0$ ,  $R = R_0$ ) максимальная дальность  $R_0$  достигается при  $\alpha_{\text{э.п}} = 1$ . При наличии потерь для достижения этой же дальности, как отмечалось ранее, ОСШ, определяющее чувствительность приемника, должно быть уменьшено в  $\alpha_{\text{э.п}}$  раз.

Из (9) и рис. 1 следует, что при использовании ФМРС со скачкообразным изменением фазы между элементарными импульсами максимальная дальность РЛС при фиксированном уровне шума может уменьшиться на 24 % ( $\alpha_{\text{э.п}} = 3$ ), в отли-

чие от использования ФМРС с ПИФ между элементарными импульсами, когда максимальная дальность РЛС может уменьшиться не более чем на 3 % ( $\alpha_{\text{э.п}} = 1.13$ ).

**Оценка влияния энергетических потерь при приеме ФМРС на точность измерения координат.** Ошибки измерения дальности и угловой координаты цели, определяющие точность измерения указанных координат в РЛС, записываются так [1], [5]:

$$\begin{aligned} \sigma_R &= \beta_R c T_c / (2\sqrt{Q}); \\ \sigma_\varphi &= \beta_\varphi \varphi_a / \sqrt{\pi Q}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\beta_R$ ,  $\beta_\varphi$  – коэффициенты потерь, характеризующие ухудшение потенциальных СКО дальности  $\sigma_{R_0}$  и угловой координаты  $\sigma_{\varphi_0}$  соответственно;  $c$  – скорость света;  $\varphi_a$  – ширина диаграммы направленности антенны в плоскости сканирования. Коэффициенты зависят от технической реализации системы потерь и принимают значения от 1 до 15.

Для выделения фактора влияния энергетических потерь при обработке ФМРС представим коэффициенты потерь в (10) аналогично (3):

$$\beta_R = \beta_{R_3} \beta_{R_1}; \quad \beta_\varphi = \beta_{\varphi_3} \beta_{\varphi_1},$$

где  $\beta_{R_3}$ ,  $\beta_{\varphi_3}$  – коэффициенты, определяющие энергетические потери, возникающие при обработке принимаемого сигнала;  $\beta_{R_1}$ ,  $\beta_{\varphi_1}$  – коэффициенты, определяющие потери за счет других факторов.

Для анализа влияния энергетических потерь запишем выражения потенциальных СКО измерений дальности и угловых координат:

$$\begin{aligned} \sigma_{R_0} &= \beta_{R_1} c \tau_{\text{и}} / (2\sqrt{Q_0}); \\ \sigma_{\varphi_0} &= \beta_{\varphi_1} \varphi_a / \sqrt{\pi Q_0}. \end{aligned} \quad (11)$$

При наличии энергетических потерь имеем:

$$\begin{aligned} \sigma_R &= \beta_{R_1} \beta_{R_3} c \tau_{\text{и}} / (2\sqrt{Q}); \\ \sigma_\varphi &= \beta_{\varphi_1} \beta_{\varphi_3} \varphi_a / \sqrt{\pi Q}. \end{aligned} \quad (12)$$

Разделив (12) на соответствующие им выражения (11), получим:

$$\begin{aligned} (\sigma_R / \sigma_{R_0})^2 (Q / Q_0) &= \beta_{R_3}^2; \\ (\sigma_\varphi / \sigma_{\varphi_0})^2 (Q / Q_0) &= \beta_{\varphi_3}^2. \end{aligned}$$

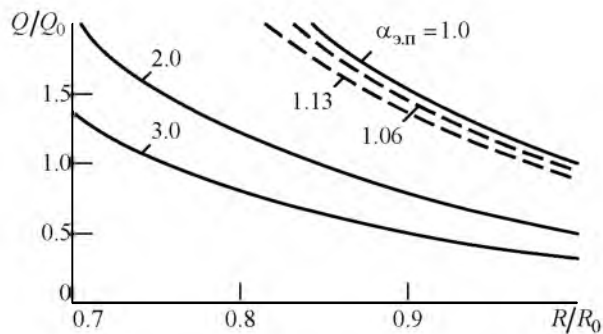


Рис. 1

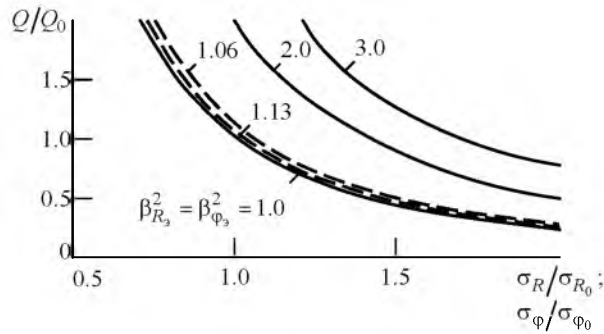


Рис. 2

На рис. 2 показаны зависимости  $Q/Q_0$  от  $\sigma_R/\sigma_{R_0}$  и  $\sigma_\phi/\sigma_{\phi_0}$  при различных значениях коэффициентов потерь. Сплошные кривые соответствуют обработке при отсутствии ПИФ, штриховые – с ее использованием.

При отсутствии потерь наименьшие дисперсии оценок дальности и угловой координаты достигаются при выходном ОСШ  $Q_0$ . При наличии потерь для уменьшения ошибок измерения дальности и угловой координаты ОСШ должно быть увеличено в  $\beta_{R_3}^2$  или в  $\beta_{\phi_3}^2$  раз. Точки пересечения горизонтальной линии  $Q/Q_0 = 1$  с кривыми, построенными при различных значениях коэф-

фициента  $\beta_{R_3}^2 = \beta_{\phi_3}^2$ , показывают увеличение ошибок измерения дальности  $\sigma_R/\sigma_{R_0}$  и угловой координаты  $\sigma_\phi/\sigma_{\phi_0}$  за счет потерь.

При применении ФМРС с ПИФ между элементарными импульсами для базы ФМРС  $n = 13$  с модуляцией фазы по закону кода Баркера, как показано ранее, коэффициент потерь равен 1.13 и 1.06 при  $\Delta\tau = 0.25\tau_{и}$  и  $0.125\tau_{и}$  соответственно.

Коэффициенты  $\beta_{R_3}^2$  и  $\beta_{\phi_3}^2$ , учитывающие энергетические потери при использовании ФМРС со скачкообразным изменением фазы между элементарными импульсами, могут достигать значений 2–3, поэтому СКО ошибок измерения дальности и угловой координаты могут увеличиваться до 73%. При использовании ПИФ эти коэффициенты не превосходят значения 1.13, следовательно, СКО увеличиваются не более чем на 6%. Таким образом, полученные результаты показывают, что при использовании в РЛС ФМРС с ПИФ между элементарными импульсами максимальная дальность РЛС может уменьшиться не более чем на 3%, а ухудшение точности измерения координат ВС в РЛС не превышает 6% от потенциально достижимой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиотехнические системы: учеб. для студ. вузов / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Академия, 2008. 592 с.
2. Дудник П. И., Ильчук А. Р., Татарский Б. Г. Многофункциональные радиолокационные системы: учеб. пособие для вузов / под ред. Б. Г. Татарского. М.: Дрофа, 2007. 283 с.
3. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы: теория и применение / пер. с англ.; под ред. В. С. Кельзона. М.: Сов. радио, 1971. 568 с.
4. Нахмансон Г. С., Суслин А. В. Корреляционные и спектральные характеристики радиолокационного

фазоманипулированного сигнала с плавным изменением фазы // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 4. С. 7–13.

5. Перевезенцев Л. Т., Огарков В. Н. Радиолокационные системы аэропортов: учеб. для вузов гражданской авиации. 2-е изд. М.: Транспорт, 1991. 360 с.

6. Нахмансон Г. С., Суслин А. В. Обнаружение фазоманипулированных сигналов с плавным изменением фазы при приеме на фоне шума // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2012. Т. 55, № 1. С. 55–60.

G. S. Nakhmanson, A. V. Suslin

*Air force academy n. a. prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh)*

### Effect of energy losses at processing phase manipulated signals to a maximum range and accuracy processing coordinate in landing radar

*Deterioration maximum range and accuracy of measurement range and angular coordinates caused by energy losses during processing phase manipulated radio signals is considered. It has been shown that a decrease of energy losses is possible by using a phase-manipulated signals with smoothly changing phase between the elementary pulses.*

Radar system, phase-manipulated signal, energy loss, smooth phase change, maximum range, accuracy processing of range, accuracy processing of angle coordinates

Статья поступила в редакцию 17 марта 2015 г.