



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; σ – 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 ξ , 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 β_R , β_φ – коэффициенты потерь, характеризующие ухудшение потенциальных СКО дальности σ_{R_0} и угловой координаты σ_{φ_0} соответственно; c – скорость света; φ_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):

$$\beta_R = \beta_{R_s} \beta_{R_i}; \quad \beta_\varphi = \beta_{\varphi_s} \beta_{\varphi_i},$$

где β_{R_s} , β_{φ_s} – коэффициенты, определяющие энергетические потери, возникающие при обработке принимаемого сигнала; β_{R_i} , β_{φ_i} – коэффициенты, определяющие потери за счет других факторов.

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

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

При наличии энергетических потерь имеем:

$$\begin{aligned} \sigma_R &= \beta_{R_i} \beta_{R_s} c \tau_{\text{и}} / (2\sqrt{Q}); \\ \sigma_\varphi &= \beta_{\varphi_i} \beta_{\varphi_s} \varphi_a / \sqrt{\pi Q}. \end{aligned} \quad (12)$$

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

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

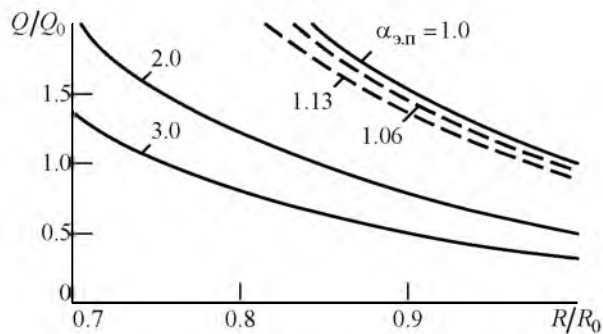


Рис. 1

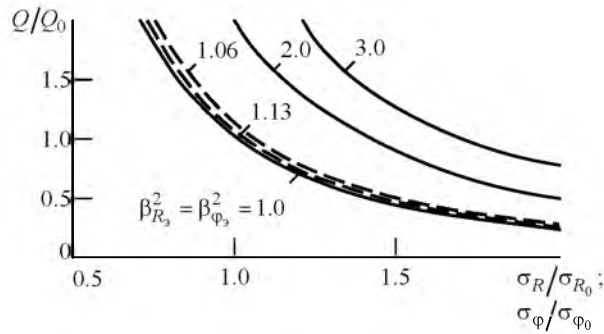


Рис. 2

На рис. 2 показаны зависимости Q/Q_0 от σ_R/σ_{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 σ_R/σ_{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 $\Delta t = 0.25\tau_{и}$ 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.