УДК 537.87 : 621.396.962

# ОПТИМИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ АНТЕННЫ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕСКОМПЕНСИРОВАННЫХ ФАЗОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ

д.ф.-м.н., проф. Е.Д. Прилепский

*Рассмотрена задача оптимизации обработки сигнала радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны (РСА) в условиях нескомпенсированных фазовых флуктуаций (ФФ) при прямолинейном движении летательного аппарата и боковом обзоре. Минимум среднего радиуса протяженности модуля функции выходного сигнала найден методом пробных функций. Получены оптимальные функции обработки сигнала при произвольной дисперсии фазовых флуктуаций.*

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Необходимость синтеза апертуры антенны возникает в тех случаях, когда технически трудно создать большую антенну для получения требуемой разрешающей способности. В условиях реального полета носителя РСА возникают случайные ФФ, искажающие принимаемый сигнал [1, 2]. Влияние нескомпенсированных ФФ на характеристики РСА рассмотрено в работах [3 – 5]. В работах [4, 5] исследовано влияние ФФ на предельную разрешающую способность РСА. Однако, полученные в работах [4, 5] результаты требуют проверки и уточнения. В частности, представляет определенный практический интерес определение предельной разрешающей способности РСА в общем случае произвольной дисперсии ФФ.

**Целью настоящей статьи** является отыскание условий, при которых существует оптимальное время синтезирования апертуры антенны в условиях ФФ, и соответствующей этому времени оптимальной весовой функции системы обработки РСА.

Основные соотношения и формулировки. Сигнал на выходе линейной части системы обработки РСА можно описать функцией [4]

$$F(\tau) = \int_{-T/2}^{T/2} H(t) \exp\{j[-2\alpha t\tau + \beta(t)]\} dt ,$$

где T – временной интервал синтезирования апертуры антенны; t – текущее время на интервале; H(t) – весовая функция системы обработки; $\alpha = 2\pi V^2 (R\lambda)^{-1}$; V – скорость носителя РСА; R – минимальное расстояние до цели; $\lambda$ – длина волны; $\beta(t)$ – реализация из ансамбля случайных функций, которыми описываются ФФ. Отметим, что $\int\limits_{-\infty}^{\infty}|F(\tau)|^2 dr = \alpha^{-1}\pi \int\limits_{-T/2}^{T/2} H^2(t)dt$ – неслучайная величина и не зависит от ФФ. Не уменьшая общности, можно положить

$$\int\limits_{-T/2}^{T/2} H^2(t)dt = 1\,. \tag{1}$$

Согласно методу моментов [3] протяженность модуля функции выходного сигнала по параметру $\tau$ можно оценить средним по ансамблю радиусом протяженности $R_F$:

$$R_F = \left\langle \int\limits_{-\infty}^{\infty} (\tau - m)^2 |F(\tau)|^2 d\tau \right\rangle \left[ \int\limits_{-\infty}^{\infty} |F(\tau)|^2 d\tau \right]^{-1}, \tag{2}$$

где $\langle\cdot\rangle$ – статистическое усреднение по реализациям, m – центр модуля функции выходного сигнала

$$m = \int\limits_{-\infty}^{\infty} \tau |F(\tau)|^2 d\tau \left[ \int\limits_{-\infty}^{\infty} |F(\tau)|^2 d\tau \right]^{-1}. \tag{3}$$

В дальнейшем будем считать, что на концах интервала синтезирования весовая функция обращается в нуль: $H(\pm T/2) = 0$, так как если $H(\pm T/2)$ имеет скачок, то $R_F \to \infty$. С учетом этого граничного условия получим

$$m = (2\alpha)^{-1}\omega_0\,, \tag{4}$$

где $\omega_0 = \int\limits_{-T/2}^{T/2} \omega H^2(t)dt$, $\omega = \dot{\beta}$ – производная случайного процесса $\beta(t)$. Будем считать $\beta(t)$ стационарным процессом, так что $\langle\beta\rangle = 0$, $\langle\omega\rangle = 0$ и $\langle\omega_0\rangle = 0$. С учетом соотношения (4) получим

$$R_F = (2\alpha)^{-2} \left\{ \int\limits_{-T/2}^{T/2} \dot{H}^2(t)dt + \sigma_\omega^2 - \sigma_\omega^2 \iint\limits_{-T/2}^{T/2} \rho_\omega(t - t')H^2(t)H^2(t')dtdt' \right\}, \tag{5}$$

где $\sigma_\omega^2 = \langle\omega^2\rangle$ – дисперсия частоты, $\rho_\omega(t - t')$ – коэффициент корреляции.

Используя соотношение $\sigma_\omega^2\rho_\omega(t) = -\sigma_\beta^2 d^2\rho_\beta(t)/dt^2$ и интегрируя по частям выражение (5), получим

$$R_F = (2\alpha)^{-2} \left\{ \int\limits_{-T/2}^{T/2} \dot{H}^2(t)dt + \sigma_\omega^2 - \sigma_\beta^2 \iint\limits_{-T/2}^{T/2} \rho_\beta(t - t') \frac{d}{dt}\left[H^2(t)\right] \frac{d}{dt'}\left[H^2(t')\right] dtdt' \right\}, \tag{6}$$

где $\sigma_\beta^2 = \langle \beta^2 \rangle$ – дисперсия ФФ; $\rho_\beta(t-t')$ – коэффициент корреляции. Введем безразмерные переменные: $x = t\tau_\beta^{-1}$; $\mu = \sigma_\omega\tau_\beta$; $\varphi(x) = H(t)\tau_\beta^{-1/2}$, где $\tau_\beta$ – параметр, определяющий время корреляции. Выражение (6) в безразмерных переменных принимает вид

$$R_F = (2\alpha\tau_\beta)^{-2}\left\{\int_{-T/2}^{T/2}\left(\frac{d\varphi}{dx}\right)^2 dx + \mu^2 - \sigma_\beta^2 \iint_{-T/2\,\tau_\beta}^{T/2\,\tau_\beta} \rho_\beta\ (x-x')\times \right. \tag{7}$$

$$\left. \times\frac{d}{dx}\left[\varphi^2(x)\right]\frac{d}{dx'}\left[\varphi^2(x')\right]dx dx'\right\},$$

где $\mu^2 = -\sigma_\beta^2 d^2\rho_\beta(x)/dx^2$ при $x = 0$.

В общем случае произвольных дисперсий $\sigma_\beta$ для определения минимума функционала $R_F$ (7) можно воспользоваться методом пробных функций, т.е. искать оптимальную функцию обработки $\varphi_0(x)$ в виде комбинации базисных функций с неизвестными параметрами. После подстановки $\varphi_0(x)$ в выражение (7) получаем $R_F$ как функцию этих параметров. Затем находим эти параметры из условия минимума $R_F$. Для иллюстрации в качестве простейшей из пробных функций можно, как следует из результатов работы [5], взять $\varphi_0(x) = A\exp\left(-\gamma x^2\right)$ с неизвестным параметром $\gamma$. В случае, когда коэффициент корреляции $\rho_\beta(x) = \exp\left(-x^2\right)$, получаем $R_F$ как функцию параметра $\gamma$:

$$R_F = (2\alpha\tau_\beta)^{-2}\left\{\gamma + 2\sigma_\beta^2\left[1-\left(1+\gamma^{-1}\right)^{-3/2}\right]\right\}. \tag{8}$$

Величина $R_F$ (8) достигает минимума для величины $\gamma = \gamma_0$, удовлетворяющей уравнению

$$3\gamma^{1/2}(1+\gamma)^{-5/2} = \sigma_\beta^{-2}. \tag{9}$$

Анализ показывает, что решение уравнения (9) существует при дисперсии ФФ большей некоторого критического значения: $\sigma_\beta \geq \sigma_{кр} = 1{,}075$, для которого $\gamma_0 = 0{,}27$. Зависимость $\gamma_0(\sigma_\beta)$ показана на рис. 1 (кривая 1). Асимптота зависимости $\gamma_0(\sigma_\beta)$ при $\sigma_\beta >> \sigma_{кр}$ имеет вид: $\gamma_0 = (1{,}758\sigma_\beta - 1{,}363)$. Оптимальный интервал синтезирования апертуры антенны $T_0$ определим через эффективную ширину оптимальной весовой функции обработки $\varphi_0(x)$:

$$T_0\tau_\beta^{-1} = 2\gamma_0^{-1/2} \approx 2(1{,}758\sigma_\beta - 1{,}363)^{-1/2}. \tag{10}$$

Для сравнения рассмотрим еще случай, когда коэффициент корреляции выражается формулой $\rho_\beta(x) = (\pi x)^{-1}\sin(\pi x)$ при той же пробной функции как и в предыдущем случае. Величина $R_F$ достигает минимума для $\gamma = \gamma_0$, удовлетворяющего уравнению

$$\left[3\pi^{-1/2}\gamma^{1/2}\mathrm{Erf}\left(\frac{\pi}{2\sqrt{\gamma}}\right)-(2\gamma)^{-1}\left(6\gamma+\pi^2\right)\exp\left(-\frac{\pi^2}{4\gamma}\right)\right]=\sigma_\beta^{-2}, \qquad (11)$$

где $\mathrm{Erf}(x)=2\pi^{-1/2}\int\limits_0^x \exp\left(-t^2\right)dt$ – интеграл вероятности. Решение уравнения (11) существует при $\sigma_\beta \geq \sigma_{кр} = 1{,}023$, для дисперсии $\sigma_{кр}$ величина $\gamma_0 = 0{,}95$. Зависимость $\gamma_0(\sigma_\beta)$ показана на рис. 1 (кривая 2). Асимптота зависимости $\gamma_0(\sigma_\beta)$ при $\sigma_\beta >> \sigma_{кр}$ имеет вид: $\gamma_0 =$ $= (2{,}242\sigma_\beta - 1{,}044)$. Оптимальный интервал синтезирования апертуры антенны $T_0$ в этом случае равен

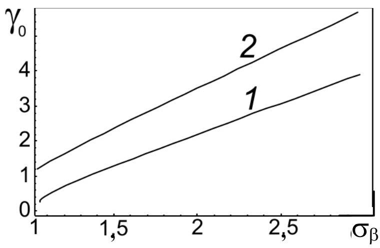


Рис. 1. Зависимость величины $\gamma_0$ от дисперсии ФФ$\sigma_\beta$

$$T_0\tau_\beta^{-1} = 2\gamma_0^{-1/2} = 2\left(2{,}242\sigma_\beta - 1{,}044\right)^{-1/2}.$$

**Выводы.** Показано, что в случае, когда дисперсия ФФ больше некоторого критического значения, существует оптимальное время синтезирования раскрыва антенны РСА, обеспечивающее минимальную ширину среднего радиуса протяженности модуля функции выходного сигнала.

## ЛИТЕРАТУРА


1. *Кондратенков Г.С., Потехин В.А., Реутов А.П., Феоктистов Ю.А. Радиолокационные станции обзора Земли. – М.: Радио и связь. – 1983. – 272 с.*
2. *Богачев А.С., Толстов Е.Ф. Современные радиолокационные системы с синтезированной апертурой антенны. – М.: ВИНИТИ. – 1986. – Т. 36. – С. 55 – 88.*
3. *Ицхоки Я.С., Сазонов Н.А., Толстов Е.Ф. Основные характеристики РСА при произвольном движении летательного аппарата // Радиотехника и электроника. – М.: АН СССР. – 1984. – Т. 29, № 11. – С. 2164 – 2172.*
4. *Поздняков В.Г. Определение оптимального времени обработки сигнала в РЛС бокового обзора при наличии фазовых флуктуаций // Радиотехника. – М.: Связь. – 1965. – Т.20, № 8. – С. 72 – 77.*
5. *Прилепский Е.Д., Шокин М.Г. Влияние фазовых флуктуаций на время обработки сигнала РЛС с синтезированной апертурой антенны // Радиоэлектроника. – 2000. – Вып. 10. – С. 60 – 65.*



*Поступила 25.11.2004*



***ПРИЛЕПСКИЙ Евгений Дмитриевич**, доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры физики ХУ ПС. В 1966 году окончил ХГУ. Область научных исследований – пассивная радиолокация миллиметрового диапазона, получение и обработка изображений.*