

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 некомпенсированных 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 некомпенсированных 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 синтеза 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 синтеза 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; λ – длина волны; $\beta(t)$ – реализация из ансамбля случайных функций, которыми описываются ФФ. Отметим, что $\int_{-\infty}^{\infty} |F(\tau)|^2 d\tau = \alpha^{-1} \pi \int_{-T/2}^{T/2} H^2(t) dt$ – неслучайная величина и не зависит от ФФ. Не уменьшая общности, можно положить

$$\int_{-T/2}^{T/2} H^2(t) dt = 1. \quad (1)$$

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

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

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

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

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

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

где $\omega_0 = \int_{-T/2}^{T/2} \omega H^2(t) dt$, $\omega = \dot{\beta}$ – 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

$$R_F = (2\alpha)^{-2} \left\{ \int_{-T/2}^{T/2} \dot{H}^2(t) dt + \sigma_{\omega}^2 - \sigma_{\omega}^2 \iint_{-T/2}^{T/2} \rho_{\omega}(t-t') H^2(t) H^2(t') dt dt' \right\}, \quad (5)$$

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

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

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 τ_β – параметр, определяющий время корреляции. Выражение (6) в безразмерных переменных принимает вид

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

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

В общем случае произвольных дисперсий σ_β 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 $\varphi_0(x) = A \exp(-\gamma x^2)$ с неизвестным параметром γ . В случае, когда коэффициент корреляции $\rho_\beta(x) = \exp(-x^2)$, получаем R_F как функцию параметра γ :

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

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

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

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 $\sigma_\beta \gg \sigma_{кр}$ 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 $\varphi_0(x)$:

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

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

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

где $\text{Erf}(x) = 2\pi^{-1/2} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ – интеграл вероятности.

Решение уравнения (11) существует при $\sigma_\beta \geq \sigma_{\text{кр}} = 1,023$, для дисперсии $\sigma_{\text{кр}}$ величина $\gamma_0 = 0,95$. Зависимость $\gamma_0(\sigma_\beta)$ показана на рис. 1 (кривая 2). Асимптота зависимости $\gamma_0(\sigma_\beta)$ при $\sigma_\beta \gg \sigma_{\text{кр}}$ имеет вид: $\gamma_0 = (2,242\sigma_\beta - 1,044)$. Оптимальный интервал синтезирования апертуры антенны T_0 в этом случае равен

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

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.

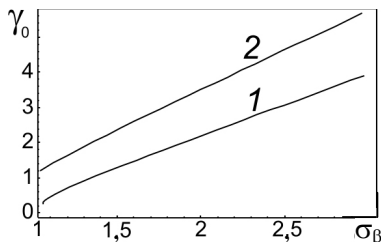


Рис. 1. Зависимость величины γ_0 от дисперсии ФФ σ_β

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.: ВИНТИ. – 1986. – Т. 36. – С. 55 – 88.
3. Иццоки 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.