

АНАЛОГО-ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОВ БОЛЬШОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ В РЛС С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Брызгалов А.П., Караулова Е.В., Хныкин А.В.

ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»,
125319 Москва, ул. Викторенко, 7, тел.: 157-9328, факс: 157-9200, e-mail: bryzgalov@gosniias.ru

Потенциальные возможности радиолокационных систем при использовании в них широкополосных сигналов (ШПС) и, тем более, сверхширокополосных сигналов (СШС) большой длительности, у которых полоса соизмерима с минимальной частотой в спектре сигнала, а коэффициент сжатия может составлять, например, 10^7 и более, очень велики [1,2]. Однако переход к ШПС и, особенно, к СШС порождает ряд проблем, в том числе, связанных с технической реализацией таких систем.

Следует отметить, что при расширении полосы сигнала для его генерации и усиления наиболее подходят твердотельные усилители. Но эти усилители обеспечивают формирование сигналов с относительно невысокими средней и импульсной мощностями. Поэтому приходится переходить к зондирующим сигналам большой длительности. Например, для картографирования на дальностях 30...50 км необходимая длительность зондирующего сигнала может составлять миллисекунды, т.е. его длительность значительно превышает его задержку или, по крайней мере, интервал задержек, соответствующий лоцируемому интервалу дальности. Это приводит к появлению таких новых проблем, как отсутствие временной развязки зондирующего и отраженных сигналов, увеличение уровня мешающих сигналов, воздействующих по боковым лепесткам сжатого сигнала и пр. Но одновременно появляется возможность значительного упрощения решения другой проблемы, связанной с технической реализацией согласованной обработки СШС в приемных модулях.

Постановка задачи. Рассматривается лоцирование поверхности с помощью РЛС с синтезированной апертурой, использующей для этого зондирующий СШС в виде когерентной последовательности линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) импульсов. Прием осуществляется несколькими приемными модулями. В этом случае на входе l -го приемника сигнал, отраженный от m -го элемента поверхности при зондировании k -ым импульсом пачки, может быть записан в виде:
$$U_{\text{вх_lkm}}(t) = A_m \cos[\Phi_{\text{c_lkm}}(t) + \varphi_{\text{c0m}}],$$
 где фаза $\Phi_{\text{c_lkm}}(t)$ определяется зондирующим сигналом и расположением передающего и приемных элементов и m -ого элемента поверхности, φ_{c0m} - начальная фаза.

При формировании радиолокационного изображения (РЛИ) согласованная обработка должна осуществляться для каждого элемента разрешения на лоцируемом участке поверхности. Такая согласованная обработка входной информации, в том числе, и с учетом декорреляции зондирующих сигналов при их прохождении приемо-передающих трактов РЛС, трасс распространения и при переотражении от лоцируемой поверхности [1,2], может быть получена за счет применения корреляционной обработки. При этом, в общем случае, в каждом приемнике для каждого элемента разрешения требуется свой опорный сигнал, и для m -го элемента обработка может быть записана:

$$U_{\text{вых_lm}} = \sum_{k=0}^{K-1} \int_{t_0+kT_n}^{t_0+kT_n+\tau_n} U_{\text{вх_lk}}(t) S_{\text{он_lmk}}(t) dt,$$

где $U_{\text{вх_lk}}$ - входной сигнал, τ_n - длительность одного импульса, t_0 - начало пачки, а K и T_n - число импульсов в пачке и период их повторения.

При согласованном приеме

$$S_{\text{он_lmk}}(t) = \cos[\Phi_{\text{c_lmk}}(t) + \varphi_{\text{c0m}}]. \quad (1)$$

Такую обработку, используя только аналоговую или цифровую технику, для СШС реализовать практически невозможно. Поэтому рассматривается вариант, когда в приемник вводится гетеродин, сигнал которого согласован, например, с отраженным сигналом одного из элементов разрешения. При этом, так как $\tau_n \gg \Delta\tau_{\text{макс}}$, где $\Delta\tau_{\text{макс}}$ - максимальное различие временных задержек отраженных сигналов, то после гетеродина полоса сигнала резко уменьшается. Так, например, если девиация частоты в импульсе $f_{\text{дев}} = 5$ ГГц, $\tau_n = 10$ мс, ширина полосы лоцируемой поверхности - 15 км, а сигнал гетеродина согласован с центральным элементом дальности, то разностная частота на выходе гетеродина составляет примерно 25 МГц. Это позволяет вводить АЦП и дальнейшую обработку осуществлять с помощью цифровых вычислителей.

Согласованная обработка. Для определения цифровой части алгоритма согласованной обработки для каждого m -го элемента поверхности можно воспользоваться выражением (1), если аргумент опорного сигнала представить в виде:

$$\Phi_{\text{c_lkm}}(t) = \Phi_{\text{рет_lk}}(t) + \Phi_{\text{но_lkm}}(t),$$

где $\Phi_{\text{гет lk}}(t)$ - аргумент опорного сигнала, задаваемого гетеродином, а $\Phi_{\text{цолкм}}(t)$ - непрерывный эквивалент цифровой обработки сигналов после гетеродинирования. Для ЛЧМ сигнала можно записать:

$$\Phi_{\text{цолкм}}(t) = 2\pi f_0 [t - \tau_{\text{лнк}} - T_{\text{n}}k] p_{\text{лнк}} + T_{\text{n}}k + \frac{\beta [t - \tau_{\text{лнк}} - T_{\text{n}}k]^2 p_{\text{лнк}}^2}{2} + \varphi_{0\text{лм}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{n}}k \leq t - \tau_{\text{лнк}} \leq T_{\text{n}}k + \tau_{\text{n}}$, $\beta = \frac{2\pi f_{\text{дев}}}{\tau_{\text{n}}}$, а $\tau_{\text{лнк}}$ и $p_{\text{лнк}}$ - временная задержка и коэффициент временной

трансформации [3] отраженного сигнала, обусловленный наличием радиальной составляющей скорости между носителем РЛС и лоцируемым элементом.

Вводимый сигнал гетеродина настроен в соответствии с (2) на одну из точек пространства с параметрами $\tau_{\text{гет}}$ и $p_{\text{гет}}$ (в общем случае, $\tau_{\text{гетlk}}$ и $p_{\text{гетlk}}$). Для цифровой обработки, вводя такт квантования $T_{\text{кв}}$, можно также записать:

$$\Phi_{\text{цолкм}}(i) = \Delta\omega_{\text{разн лнк}} [T_{\text{кв}}(i-1) - \tau_{\text{гет}} - T_{\text{n}}k] + \frac{\Delta\beta_{\text{разн лнк}} [T_{\text{кв}}(i-1) - \tau_{\text{гет}} - T_{\text{n}}k]^2}{2} + \Delta\varphi_{\text{разн лнк}},$$

$$\text{где } \Delta\omega_{\text{разн лнк}} = -\omega_0 (p_{\text{гет}} - p_{\text{лнк}}) + \beta (\tau_{\text{гет}} - \tau_{\text{лнк}}) p_{\text{лнк}}^2, \quad (3)$$

$$\Delta\mathbf{v}_{\text{разн лнк}} = -\mathbf{v} (p_{\text{гет}}^2 - p_{\text{лнк}}^2), \quad (4)$$

$$\Delta\varphi_{\text{разн лнк}} = \omega_0 (\tau_{\text{гет}} - \tau_{\text{лнк}}) p_{\text{лнк}} + \frac{\beta (\tau_{\text{гет}} - \tau_{\text{лнк}})^2 p_{\text{лнк}}^2}{2}.$$

(5)

Первые два слагаемых и коэффициенты (3) и (4) определяют цифровую обработку (фильтрацию) в импульсе, а (5) определяет межпериодную обработку. Таким образом, обработка входной информации реализуется в три этапа. На первом этапе осуществляется перемножение входного сигнала на сигнал гетеродина. Это этап аналоговой обработки. Он завершается полосовыми фильтрами и АЦП. На втором этапе реализуется обработка за каждый импульс зондирования (осуществляется дискретная свертка входных и опорных сигналов). Наконец, на третьем этапе осуществляется межпериодная обработка. При наличии нескольких приемных модулей вводится 4 этап, на котором должно быть проведено суммирование результатов обработки в разных приемных модулях.

Упрощение цифровой обработки в импульсе. Согласованную обработку для всех разрешаемых элементов лоцируемой поверхности реализовать очень сложно, а в реальном времени при СШС - практически невозможно. Упрощение обработки можно получить за счет использования единой обработки для группы элементов. В первую очередь, это, конечно, относится к обработке информации за импульс, так как это может дать существенное уменьшение вычислительных затрат. Упрощение допустимо, если при переходе от рассмотрения автокорреляционной функции для каждого m -го элемента разрешения (от согласованной обработки) к взаимокорреляционной функции (при использовании q -ого опорного сигнала) результирующие потери допустимо малы.

Цифровую обработку за импульс (второй этап обработки) в соответствии с (3)...(5) можно разложить на два подэтапа. Упрощение проводится на 1-ом подэтапе, на котором вместо согласованной обработки для каждого $\Delta p_{\text{лкм}} = p_{\text{гет}} - p_{\text{лкм}}$ используется одно из опорных значений $\Delta p_{\text{опq}} = (2q - 1)\Delta p_{\text{доп}}$. Можно показать, что допустимое отклонение $\Delta p_{\text{доп}}$ составляет:

$$\Delta p_{\text{доп}} = \frac{k_p}{2\tau_{\text{n}}(f_0 + f_{\text{дев}})} \quad \text{при } k_p \ll 1.$$

Общее число опорных значений M_p определяется максимальным и минимальным значениями $p_{\text{лкм}}$ и $\Delta p_{\text{доп}}$. Это число должно быть сопоставлено с количеством $M_{\text{согл}}$ элементов разрешения РЛИ поверхности при $\tau_{\text{лнк}} = \text{const}$, облучаемых при одном зондировании. Это число определяет число опорных каналов по τ при согласованной обработке. Так как $M_p \ll M_{\text{согл}}$, то выигрыш в объеме вычислений при рассмотренной упрощенной обработке может быть существенным.

Второй подэтап цифровой обработки за импульс связан с образованием каналов по τ . Допустимый шаг вычислений по τ равен $k_{\tau}/f_{\text{дев}}$, что соответствует разрешению РЛИ по наклонной дальности и определяет число каналов по τ . Вместе с тем, исходя из (3), вместо $\tau_{\text{лнк}}$ можно использовать частоты $\Delta\omega_{\text{лнк}} \approx \beta(\tau_{\text{гет}} - \tau_{\text{лнк}})$. Если допустимый шаг по τ может быть взят $1/f_{\text{дев}}$, то шаг по частоте равен $1/\tau_{\text{n}}$. В этом случае согласованную обработку для всех опорных частот можно выполнить, например, с помощью быстрого преобразования Фурье, осуществляемого в каждом из M_p каналов.

Таким образом, корреляционная обработка СШС большой длительности, осуществляемая в три этапа, позволяет уже на первом этапе аналогового гетеродинирования резко уменьшить полосу сигнала и последующую обработку реализовывать цифровыми методами. На втором этапе при упрощенной обработке образуют M_p каналов по частоте и для каждого из них формируют M_t выходов по задержке. Далее, для каждого m -го элемента определяют его выход и эти сигналы обрабатывают согласно выражению (5), осуществляя тем самым третий этап – межпериодную обработку.

Литература

1. «Исследование высокоинформативных методов радиолокации, основанных на применении сверхширокополосных сигналов большой длительности...». Отчет/ГосНИИАС. №50(14334)98, 1998.
2. Брызгалов А.П. Применение сверхширокополосных сигналов большой длительности в связи и локации. Всероссийская конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». Сборник докладов. Муром, 2003г.
3. Брызгалов А.П. Обобщенная базовая корреляционная функция сверхширокополосных сигналов большой длительности.//Радиотехника и электроника. 2002.Т.47.№1.С.84.