

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ШУМОВАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Калинин В.И., Чапурский В.В., Черепенин В.А.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Рассмотрен метод сверхширокополосной шумовой радиолокации на основе антенн с пространственной обратной связью. Проведен теоретический анализ и численное моделирование взаимно корреляционных функций принятого и опорного сигналов для различных схем построения шумовых радиолокаторов. Обнаружен эффект сверхразрешения при накоплении опорного сигнала в кольцевом рециркуляторе передатчика.

Одним из перспективных путей построения сверхширокополосных радиолокационных систем (РЛС) с повышенной скрытностью работы является применение непрерывных или квазинепрерывных шумовых зондирующих сигналов [1-3]. В последнее время применительно к таким РЛС вновь повысился интерес к использованию принципа зондирования целей, основанного на рециркуляции шумового сигнала в пространственном кольце обратной связи «РЛС-цель-РЛС» [4-7]. Такое кольцо замыкается путем введения части принимаемого сигнала в тракт передачи, суммирования его с сигналом передатчика и излучения суммарного сигнала на цель. В зарубежной литературе новый класс радиолокационных систем с пространственной рециркуляцией получил название retrodirective radar (RDR) systems [4]. Данный метод позволяет увеличивать потенциал и улучшать разрешающую способность РЛС при обнаружении и последующем сопровождении целей, в том числе в РЛС с антенными системами типа ММО [4-5]. Вместе с тем в вопросах выбора методов обработки шумовых сигналов в РЛС с пространственной рециркуляцией имеется ряд нерешенных вопросов, части которых и посвящено содержание данной работы.

В настоящей статье предложен и исследован новый принцип построения RDR систем основанный на накоплении опорного шумового сигнала в кольцевом рециркуляторе передатчика с близкими параметрами к внешнему рециркулятору с пространственной обратной связью (рис.1). Схема передатчика содержит дополнительное кольцо рециркуляции исходного шумового сигнала с опорной задержкой τ и коэффициентом рециркуляции $\gamma_0 < 1$ близким по величине к ослаблению сигнала $\gamma < 1$ в кольце с пространственной обратной связью и задержкой до отражающей цели τ_t . Дополнительное кольцо рециркуляции, выделенное на блок-схеме пунктиром, может быть образовано на основе аналоговых или цифровых устройств обработки широкополосных сигналов.

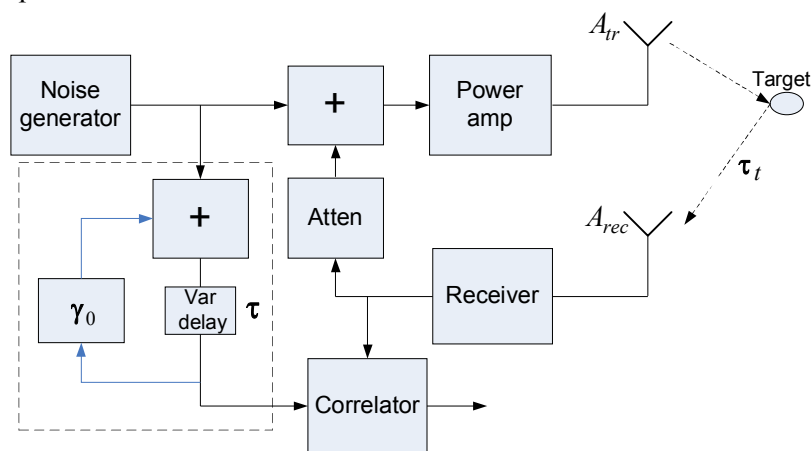


Рис. 1.

Сигнал с выхода опорного кольца рециркуляции подается на один вход коррелятора, на другой вход которого подается сигнал пространственной рециркуляции с выхода приемника РЛС. Теоретический анализ выполнен при условии произвольной длительности огибающей $A(t)$ шумового импульса $A(t)\xi(t)$, где $\xi(t)$ является стационарным случайным процессом с нулевым математическим ожиданием, корреляционной функцией $k_\xi(\tau) = \mathbf{M}\{\xi(t)\xi(t + \tau)\}$ (\mathbf{M} - символ математического ожидания) и временем корреляции τ_ξ .

Сигнал на выходе приемника и опорный рециркуляционный сигнал выражаются соответственно формулами:

$$\eta(t, \tau_t) = \sum_{k=0}^{\infty} K_\Sigma^{k+1} \gamma^k A(t - (k+1)\tau_t) \xi(t - (k+1)\tau_t), \quad (1)$$

$$\eta_0(t, \tau_0) = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_0^k A(t - (k+1)\tau_0) \xi(t - (k+1)\tau_0). \quad (2)$$

Среднее значение корреляционного интеграла, являющегося в данном случае средним выходным эффектом взаимно-корреляционной обработки сигналов (1) и (2), после вычисления интеграла по t и статистического усреднения получается в виде:

$$\begin{aligned} \bar{Q}(\tau_t, \tau_0) &= \mathbf{M} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t, \tau_t) \eta(t, \tau_0) dt \right\} = \\ &= \sum_{k_1, k_2=0}^{\infty} K_\Sigma^{k_1+1} \gamma^{k_1} \gamma_0^{k_2} [b(\Delta_{k_1, k_2}(\tau_0, \tau_t)) - a(\Delta_{k_1, k_2}(\tau_0, \tau_t))] \times \\ &\quad \times h(b(\Delta_{k_1, k_2}(\tau_0, \tau_t)) - a(\Delta_{k_1, k_2}(\tau_0, \tau_t))) \cdot k_\xi(\Delta_{k_1, k_2}(\tau_0, \tau_t)), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta_{k_1, k_2}(\tau_0, \tau_t) = (k_2 + 1)\tau_0 - (k_1 + 1)\tau_t$, $a(\Delta) = \max(0, \Delta)$, $b(\Delta) = \min(T, T + \Delta)$

Полученное выражение является общим. Численное моделирование корреляционного интеграла (3) и сравнение с результатами взаимно-корреляционной обработки для случая RDR радара с задержкой опорного шумового сигнала [5-6] проводились в предположении большой длительности шумового импульса $T \gg \tau_t \gg \tau_\xi$ с полосой частот $\Delta f = 400$ МГц СШП шумового сигнала от $f_l = 100$ МГц до $f_h = 500$ МГц. Другие параметры задачи выбирались равными: общий коэффициент разомкнутого кольца пространственной обратной связи $K_\Sigma = 1$, задержка сигнала до цели и обратно $\tau_t = 50$ нс, ослабление в опорном рециркуляторе $\gamma_0 = 0.9$ и ослабление в кольце пространственной обратной связи $\gamma = 0.9$.

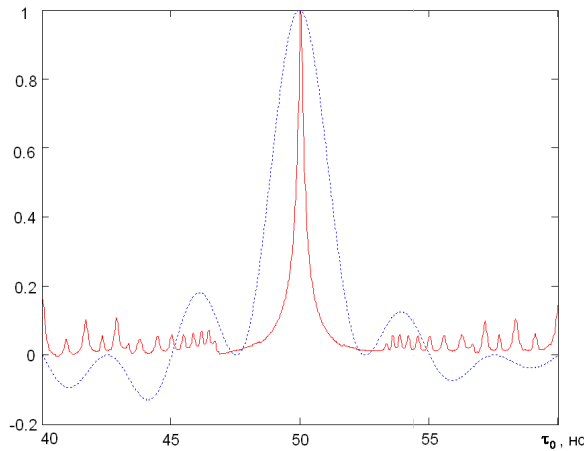


Рис. 2.

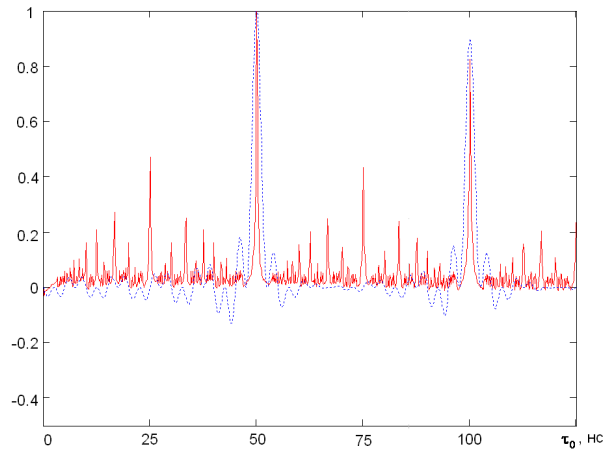


Рис. 3.

В интервале задержек $40\text{нс} \leq \tau_0 \leq 60\text{нс}$, симметричного относительно задержки сигнала цели, на рис. 2 показаны корреляционные отклики на выходе РЛС с рециркуляцией при взаимно-корреляционной обработке принимаемого сигнала с обычным задержанным опорным сигналом от генератора шума – (точечная линия) и при рециркулированном опорном сигнале – (сплошная линия). Явно видно существенное улучшение разрешающей способности при использовании рециркулированного опорного сигнала, в то время как при использовании классической опоры разрешение остается на уровне шумовой РЛС без режима пространственной рециркуляции. Анализ корреляционных эффектов (рис.3) на интервале задержек τ_0 , равных нескольким периодам пространственной рециркуляции, показывает наличие интенсивных комбинационных максимумов, для исключения которых необходимо привлекать стробирование по времени, например, путем уменьшения длительности T шумового импульса, или предварительного вычисления задержек и подавления комбинационных максимумов для каждой возможной пары задержек τ_0 и τ_t .

Теоретический анализ и численное моделирование позволили выявить наличие рециркуляционных максимумов на задержках, кратных задержке сигнала при отражении от цели, а также оценить и сопоставить разрешающие способности рассмотренных методов по задержке (дальности). Оказалось, что только при взаимно корреляционной обработке с рециркулированным опорным сигналом возможно получение разрешающей способности по дальности, в несколько раз превосходящей разрешающую способность классической шумовой РЛС и фактически получить эффект сверхразрешения. В силу высокой разрешающей способности этот метод требует дальнейшего углубленного изучения, особенно в части анализа результатов для больших задержек (дальностей цели) и развития способов исключения комбинационных откликов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Poirier J.L. Quasi-monochromatic scattering and some possible radar applications/ Radio Science, 1968, v. 3, N9, pp 881-886 («Зарубежная радиоэлектроника» 1969, №7, с. 12.).
2. В.И. Калинин, В.В. Чапурский. Эффективность двойного спектрального анализа в шумовой радиолокации при действии отражений от местных предметов. Радиотехника и электроника, 2006, том 51, №3, с. 303-313.
3. Lesturgie M., Eglizeaud J.P., Muller D., Olivier B., Delhote Ch. The last decades and the future of low frequency radar concepts in France. RADAR 2004 – International Conference on Radar Systems, ISE-PLEN-3. Toulouse, France, 2004.
4. Shalab Gupta, T.R. Brown, Noise-Correlating Radar Based on Retrodirective Antennas. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, v.43, №2, April, pp.472-479.
5. Калинин В.И., Чапурский В.В. Сверхширокополосная шумовая радиолокация на основе антенных решеток с рециркуляцией сигналов. Радиотехника и электроника, 2008, т. 53, №10, с. 1266-1277.
6. V.V Chapursky, V.A. Cherepenin, and V.I. Kalinin, Signal Processing and Time Delay Resolution of Noise Radar System Based on Retrodirective Antennas, Proc. PIERS 2009 in Moscow, Progress in Electromagnetics Research Symposium, Moscow, Russia, August 18-21, 2009.
7. Калинин В.И., Крылова М.С., Турыгин М.С.// Сб. докл. Всеросс. Научн. Конф. «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». Муром, 1 – 3 июля 2003 г. / Муром 2003. С. 415.