

## **ОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ НИЗКОЛЕТЯЩЕЙ НАДВОДНОЙ ЦЕЛИ НА ФОНЕ “АНГЕЛ-ЭХО” ЗА ПРЕДЕЛАМИ РАДИОГОРИЗОНТА**

С.В. Яровой

(Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба)

*Приведены результаты эксперимента по изучению статистических характеристик эхо-сигналов от маловысотных воздушных объектов, находящихся за пределами радиогоризонта над морем. Предложен оптимальный алгоритм и построена схема измерителя доплеровской частоты эхо-сигнала от маловысотного объекта находящегося за пределами радиогоризонта.*

***оптимальный алгоритм, низколетящая надводная цель, радиогоризонт***

**Постановка проблемы.** Специфические погодные условия, присущие району Черного моря, способствуют распространению электромагнитной энергии (ЭМЭ) радиоволн за пределы радиогоризонта и обнаружению радиолокатором находящихся там воздушных объектов (ВО). При этом обеспечивается локация маловысотных объектов над морем на дальностях в несколько раз превышающих дальность их прямой видимости [1].

Вместе с тем, способствующие распространению радиоволн (РРВ) за пределы радиогоризонта погодные условия обуславливают возникновение локальных тропосферных неоднородностей (резкие изменения коэффициента преломления тропосферы  $n(\bar{r})$ ), которые, в свою очередь, являются для радиолокатора естественными пассивными помехами, получившими название “ангел-эхо” (АЭ) [2]. Множественный характер подобных локальных образований значительно “зашумляет” индикатор кругового обзора радиолокационной станции (РЛС), затрудняет задачу обнаружения цели на их фоне оператором и фактически парализует алгоритмы вторичной обработки РЛС и АСУ. Поэтому для надежной локации цели за пределами радиогоризонта необходим алгоритм обнаружения, позволяющий селективировать цель на фоне АЭ и учитывающий влияние условий загоризонтного РРВ на параметры сигнала.

**Анализ литературы.** Одним из возможных путей решения задачи обнаружения цели на фоне АЭ является доплеровская селекция [2]. Однако описанные в [2] алгоритмы доплеровской селекции строились исходя из условий локации в пределах прямой видимости, и не учитывали влияние среды распространения на параметры сигналов.

В [1] описаны условия РРВ над морем; показано, что за пределами радиогоризонта канализация ЭМЭ радиоволн происходит по тропосферным радиоволноводам. Причем “слоистый” характер изменения коэффициента преломления тропосферы [3] способствует захвату энергии радиоволн сразу несколькими радиоволноводами, а также возможному переотражению радиоволн от стенок радиоволноводов. Таким образом, поле у объекта, который находится за пределами радиогоризонта, формируется за счет многолучевого механизма РРВ. Подобный механизм РРВ сказывается на параметрах эхо-сигналов полезным, с точки зрения улучшения селекции цели на фоне АЭ, образом.

**Цель статьи (постановка задачи).** Учитывая специфические условия РРВ над морем, синтезировать оптимальный алгоритм обнаружения низколетящей надводной цели на фоне “ангел-эхо” в условиях локации ее за пределами радиогоризонта.

**Методика анализа.** Автор [4] показал, что качество доплеровской селекции тем выше, чем точнее измерения доплеровской частоты (ДЧ). При этом максимальное качество может быть достигнуто при реализации оптимального измерения ДЧ.

Представляется возможным в условиях локации низколетящей цели над морской поверхностью на фоне АЭ за пределами радиогоризонта, используя результаты эксперимента, получить оптимальный алгоритм обнаружения цели.

Пусть в сторону лоцируемого надводного объекта излучается радиосигнал  $u(t)$ . Отраженный от движущегося с радиальной скоростью объекта сигнал –  $u_1(t)$ . В приемнике РЛС эти сигналы поступают на входы фазового детектора, выходным напряжением которого является

$$y(t) = \Omega_d \cdot t \cdot \text{rect}(t/T) + n(t), \quad (1)$$

где  $\Omega_d$  – частота Доплера;  $\text{rect}(t/T)$  – прямоугольная функция (меандр) амплитудой равной 1 В, и положительная на интервале когерентной обработки (Т);  $n(t)$  – шум фазы.

Серия экспериментов с участием автора, проводимая на Крымском побережье Черного моря, позволили исследовать сигналы отраженные от ВО находящихся за пределами радиогоризонта. Результаты обработки параметров сигналов показали, что фазовые флуктуации  $n(t)$ , при локации низколетящей надводной цели за пределами радиогоризонта, распределены по нормальному закону с дисперсией  $\sigma_{\varphi}^2$ . При этом значительную роль в изменении параметров эхо-сигналов играет многолучевой механизм РРВ. Такие специфические условия РРВ в пределах тропосферных радиоволноводов обусловили появление неко-

торой корреляции фазовых флюктуаций. В частности получено, что корреляционная функция флюктуаций фазы сигнала  $k(t - \tau)$  имеет осциллирующий вид (рис. 1). При этом интервал корреляции  $\tau_k$ , измеряемый на уровне  $0,1 k(t - \tau)$ , лежит в пределах  $0,01 \dots 0,4$  с. К тому же, увеличение дальности до лоцируемого объекта способствовало росту интервала корреляции  $\tau_k$  его фазовых флюктуаций.

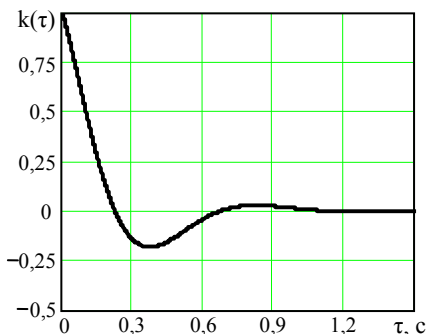


Рис. 1. Корреляционная функция фазовых флюктуаций сигнала

Аппроксимацией экспериментальных данных с использованием критерия минимума суммы квадратов отклонений получена аналитическая форма записи корреляционной функции фазовых флюктуаций сигнала

$$k(t - \tau) = \sigma_{\varphi}^2 \cdot \exp\left\{-\frac{|t - \tau|}{\tau_k}\right\} \cdot \cos w_0(t - \tau), \quad (2)$$

где  $\sigma_{\varphi}^2$  – дисперсия измерений ДЧ;  $w_0$  – частота осцилляций корреляционной функции.

Исходя из результатов эксперимента, процедуру отыскания оптимальной оценки ДЧ можно представить в виде нахождения максимума логарифма отношения правдоподобия [4]. Так для сигнала (1), в рассматриваемом случае, выражение для логарифма отношения правдоподобия имеет вид

$$\ln \ell [y(t)] = \xi(t, \Omega_d) - 0,5 \cdot q^2(t, \Omega_d). \quad (3)$$

Здесь весовой интеграл  $\xi(t, \Omega_d)$  и параметр обнаружения  $q(t, \Omega_d)$  определяются в соответствии с [4].

Тогда максимально правдоподобную оценку для ДЧ  $\Omega_d = \hat{\Omega}_d$  получают путем решения уравнения  $\frac{\partial \ln \ell [y(t)]}{\partial \Omega_d} = 0$ .

Из-за громоздкости преобразований приводятся лишь конечные выражения. Решением уравнения является [4]

$$\hat{\Omega}_d = \frac{\int_{-T/2}^{\infty} y(t) \cdot r(t) dt}{\int_{-T/2}^{\infty} t \cdot r(t) dt}, \quad (4)$$

где весовая функция  $r(t) = \frac{\partial}{\partial \Omega_d} r(t, \Omega_d)$  находится из интегрального уравнения

$$\int_{-\infty}^{\infty} k(t-\tau) \cdot r(\tau) d\tau = t \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right). \quad (5)$$

Применительно к случаю, если фазовые флюктуации принимаемого сигнала описываются выражением (2), максимально правдоподобную оценку доплеровского смещения частоты  $\hat{\Omega}_d$  сигнала отраженного от надводного объекта, лоцируемого за пределами радиогоризонта получим

$$\hat{\Omega}_d = k_1 \cdot y_1 - k_2 \cdot y_2 + k_3 \left[ y\left(\frac{T}{2}\right) - y\left(-\frac{T}{2}\right) \right]. \quad (6)$$

В выражении (6) приняты следующие обозначения:

$$k_1 = \frac{L}{T^3} \cdot \frac{2b^2}{c}; \quad k_2 = \frac{L}{T^2} \cdot c^2 \cdot \gamma^2 \frac{2bc^{-1} + 4b^{-1}}{A_1};$$

$$k_3 = \frac{L}{T} \cdot \frac{c}{2} \cdot \left( 1 + \frac{1}{c} + \gamma^2 \cdot c \cdot \frac{A_2}{A_1} \right);$$

$$A_1 = ch \frac{b}{c} + b \cdot sh \frac{b}{c}; \quad A_2 = ch \frac{b}{c} - \frac{2c}{b} \cdot sh \frac{b}{c};$$

$$y_1 = \int_{-T/2}^{T/2} t \cdot y(t) dt; \quad y_2 = \int_{-T/2}^{T/2} sh(at) \cdot y(t) dt;$$

$$\frac{1}{L} = \frac{b^2}{6c} - c^2 \cdot \gamma^2 \cdot \left( 1 + \frac{2c}{b} \right) \frac{A_2}{A_1} + \frac{c}{2} \cdot \left( 1 + \frac{1}{c} + \gamma^2 \cdot c \cdot \frac{A_2}{A_1} \right);$$

$$\tau_k^{-2} + w_0^2 = a^2; \quad c = \frac{2\tau_k}{T}; \quad b^2 = 1 + c^2 \cdot \gamma^2; \quad \gamma = w_0 \cdot \frac{T}{2}.$$

Схема измерителя ДЧ сигнала приведена на рис. 2.

**Выводы.** 1. Специфические погодные условия в районе бассейна Черного моря способствуют увеличению дальности локации маловысотных объектов. А многолучевой механизм РРВ оказывает влияние на параметры эхо-сигналов таким образом, что в условиях локации ВО за пределами радиогоризонта в шумовых флюктуациях фазы появляются коррелированные составляющие с интервалом корреляции  $\tau_k = 0,01 \dots 0,4$  с.

2. При использовании фазометрического способа измерения, предложенный алгоритм позволит оптимальным образом измерять ДЧ эхо-сигналов маловысотных надводных объектов, находящихся за пределами радиогоризонта.

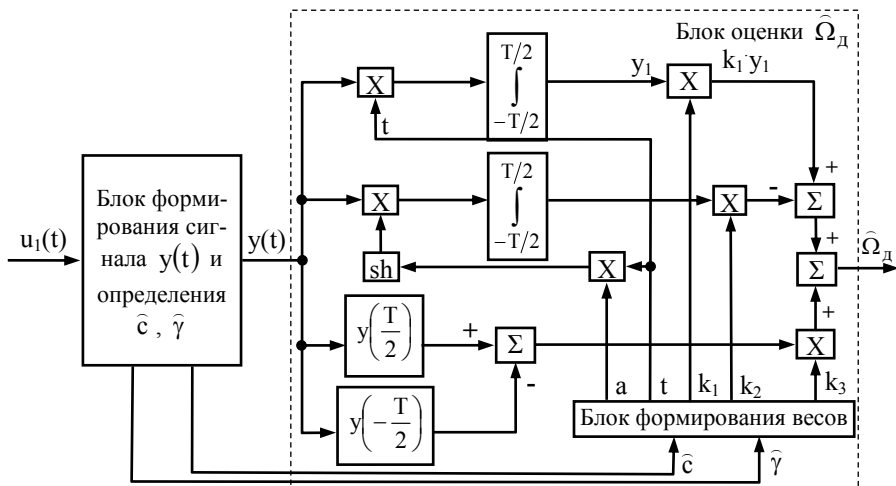


Рис. 2. Блок-схема измерителя ДЧ сигнала

3. Оптимальный измеритель ДЧ сигнала является неотъемлемой частью устройств селекции цели на фоне АЭ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью. – М.: Радио и связь, 1991. – 253 с.
2. Литвинов В.В., Жирнов В.В., Филюшкин И.П. Особенности обработки и обнаружения радиолокационных сигналов целей на фоне ДМО типа “ангел-эхо” // Судостроительная промышленность. Сер. РЛ. – 1991. – Вып. 29. – С. 83-88.
3. Михайлов Н.Ф., Рыжков А.В., Шукин Г.Г. Радиометеорологические исследования над морем. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 207 с.
4. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации: Учебное пособие для вузов. – М.: Сов. радио, 1970. – 559 с.
5. Репин В.Г., Гартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. – М.: Сов. радио, 1977. – 432 с.

Поступила 1.03.2006

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор В.Д. Карлов,  
Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба.