

УДК 621.396

В.Д. Карлов<sup>1</sup>, А.П. Кондратенко<sup>2</sup>, А.К. Шейгас<sup>1</sup>, Ю.Б. Ситник<sup>3</sup><sup>1</sup> Харківський університет Воздушних Сил імені Івана Кожедуба, Харків<sup>2</sup> Академія внутрішніх військ МВД України, Харків<sup>3</sup> Кіровоградська летня академія Національного авіаційного університету, Кіровоград

## К ВОПРОСУ О ИЗМЕРЕНИИ ДОПЛЕРОВСКОЙ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ЦЕЛИ, ЛОЦИРУЕМОЙ ЗА ПРЕДЕЛАМИ РАДИОГОРИЗОНТА НАД МОРЕМ

*Разработан математический аппарат, позволяющий по критерию максимума логарифма отношения правдоподобия синтезировать алгоритм оптимального измерения доплеровской частоты сигнала, отраженного от цели, лоцируемой над морем за пределами дальности прямой видимости. Предложено получение искомого алгоритма для произвольной корреляционной функции флуктуации фазы применительно к использованию фазометрического метода измерения доплеровской частоты, отраженного от цели сигнала.*

**Ключевые слова:** измеритель доплеровской частоты, низколетящая цель, радиогоризонт.

### Введение

**Постановка проблемы.** При локации цели над морской поверхностью, одной из задач решаемых радиолокационной станцией приморского базирования является выделение сигналов отражённых от низколетящей цели на фоне мешающих отражений. Эти отражения в основном обусловлены либо неоднородностью среды распространения радиоволн либо отражениями от морской поверхности. В известной литературе [1-3] отражения от неоднородностей среды распространения радиоволн классифицируют как ангел-эхо. Как показано в [1-3], сигналы классифицируемые как ангел-эхо имеют достаточно низкую составляющую доплеровской частоты в отражённом сигнале. По этому критерию в большинстве случаев эти сигналы и выделяют при локации низколетящих аэродинамических целей. В этом случае наиболее важным вопросом является измерение доплеровской частоты отраженного сигнала. С точки зрения общей теории радиолокации этот вопрос в литературе освещён недостаточно полно. Данная статья и посвящена устранению этого недостатка.

**Цель статьи.** С позиций общей теории радиолокации изложить подход к синтезу измерителя доплеровской частоты сигналов, отражённых от низколетящей цели.

### Основная часть

Решение задачи оптимального измерения доплеровской частоты  $\Omega_d$  рассмотрим на основе использования фазометрического метода [4]. Пусть на вход системы когерентной обработки поступает радиосигнал, отраженный от цели, лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем, который представим в виде:

$$S(t) = \dot{U}(t) \cdot \exp \left\{ j[\omega_0 t + \Omega_g t + \varphi_0 + n_1(t)] \right\},$$

где  $\omega$  – несущая частота радиосигнала;  $\varphi_0$  – постоянный сдвиг сигнала;  $n_1(t)$  – флуктуации фазы, обусловленные как влиянием неоднородностей среды распространения, так и аддитивными шумами.

Входным сигналом устройства оптимального измерения доплеровской частоты  $\Omega_g$  сигнала, отражённого от цели, будем считать фазовую реализацию  $y(t)$ , представляющую собой в пределах интервала когерентной обработки  $T$  аддитивную смесь ожидаемого сигнала в виде фазового набег  $x(t)$  который представим в виде:

$$x(t) = \Omega_g t \cdot \text{rect}(t/T), \quad (1)$$

и фазовых флуктуаций  $n_1(t)$ , то есть

$$y(t) = \Omega_g t \cdot \text{rect}(t/T) + n_1(t). \quad (2)$$

Результаты экспериментальных исследований приведённых в [5] свидетельствуют о том, что флуктуации фазы сигнала, отражённого от цели, лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем представляет собой нормальный стационарный случайный процесс с нулевым средним.

Следовательно, следуя методологии, изложенной в [6], выражение для логарифма отношения правдоподобия для сигнала (2) можно представить как

$$\ln l[y(t)] = \xi(t, \Omega_g) - \frac{1}{2} q^2(t, \Omega_g), \quad (3)$$

где весовой интеграл

$$\xi(t, \Omega_g) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) R(t, \Omega_g) dt, \quad (4)$$

а параметр обнаружения

$$q^2(t, \Omega_g) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) R(t, \Omega_g) dt. \quad (5)$$

Весовая функция  $R(t, \Omega_g)$ , в соответствии с [6], в рассматриваемом случае определяется из интегрального уравнения

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t-s)R(s, \Omega_g) ds = x(t), \quad (6)$$

где  $\Phi(t-s)$  – корреляционная функция фазовых флуктуаций  $n(t)$ .

Следуя методике, изложенной в [6], выражение для оптимальной оценки доплеровской частоты  $\Omega_g$  и дисперсии оценки  $\sigma_{\Omega}^2$  получим в виде:

$$\Omega_g = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \cdot R(t) dt * \left[ \int_{-T/12}^{T/12} t \cdot R(t) dt \right]^{-1}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\Omega}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t-s)R(t)R(s) dt ds * \left[ \int_{-T/2}^{T/2} t \cdot R(t) dt \right]^{-2}, \quad (8)$$

где весовая функция  $R(t)$  есть

$$R(t) = \frac{\partial}{\partial \Omega_g} R(t, \Omega_g), \quad (9)$$

и определяется из уравнения

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t-s)R(s) ds = t \cdot \text{rect}(t/T). \quad (10)$$

Потенциальная точность измерения доплеровской частоты с учетом особенностей РРВ в тропосферном радиоволноводе над морем определяется выражением

$$\sigma_{\Omega_{\text{opt}}}^2 = \left( \int_{-T/2}^{T/2} t \cdot R(t) dt \right)^{-1}. \quad (11)$$

Если измерение доплеровской частоты проводится измерителем оптимальным к белому шуму с корреляционной функцией

$$\Phi_0(t-s) = \frac{N_0}{2} \delta(t-s), \quad (12)$$

но на фоне коррелированных фазовых флуктуаций с корреляционной функцией  $\Phi(t-s)$ , то дисперсия оценки  $\Omega_g$  будет [16, 17]

$$\sigma_{\Omega}^2 = \frac{144}{T_n^6} \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} t \cdot s \cdot \Phi(t-s) dt \cdot ds. \quad (13)$$

Таким образом, как следует из изложенного, для осуществления оптимального измерения доплеровской частоты сигнала, отраженного от цели, лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем, необходимо знание корреляционной функции флуктуаций  $\Phi(t-s)$ . Получив выражение для  $\Phi(t-s)$ , мы можем найти весовую функцию  $R(t, \Omega_d)$  из уравнения (6). Используя выражения для весовой функции  $R(t, \Omega_d)$ , по формуле

(7), с учетом (9), находим аналитическое выражение для оптимальной оценки доплеровской частоты сигнала, отраженного от цели, лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем. Зная  $R(t, \Omega_d)$ , по формуле (8) с учетом (9) оцениваем точность измерения  $\Omega_d$  синтезированным алгоритмом.

### Вывод

Измерение доплеровской частоты сигнала отраженного от цели лоцируемой над морем за пределами дальности прямой видимости необходимо производить с учетом конкретного выражения для корреляционной функции фазовых флуктуаций. Знание корреляционной функции флуктуации фазы сигнала отраженного от цели позволит оценить и точность измерения доплеровской частоты синтезированным алгоритмом.

### Список литературы

1. Жирнов В.В. Проблема "ангел-эхо" и цифровые картинные технологии обработки радиолокационных сигналов и информации / В.В. Жирнов, В.В. Литвинов // Сб. докладов 4-й Межд. научно-технич. конференции "Радиолокация, навигация, связь". – Воронеж, 1998. – Т. 2. – С. 795 – 800.
2. Жирнов В.В. Особенности обработки и обнаружения радиолокационных сигналов целей на фоне дискретных мешающих отражений типа "ангел-эхо" / В.В. Жирнов, В.В. Литвинов, И.П. Флюшкин // Судостр. Пром. Серия РЛ. – 1991. – Вып. 29. – С. 83 – 88.
3. Принципы защиты радиопеленгаторов в условиях воздействия ДМО типа "ангел-эхо" / В.В. Жирнов и др. // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сборник. – 1997. – Вып 104. – С. 112–119.
4. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
5. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів, відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції / М.М. Петрушенко, Г.В. Певцов, В.Л. Місайлов, В.Д. Карлов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. Наук.-техн. журнал. – 2011. – № 1(5). – С. 69-72
6. Теоретические основы радиолокации / В.Н. Голиков, И.Н. Бусыгин и др. Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.

Поступила в редколлегию 15.01.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков, Харьков.

### ДО ПИТАННЯ ПРО ВИМІРЮВАННЯ ДОПЛЕРІВСЬКОЇ ЧАСТОТИ СИГНАЛА ВІДБИТОГО ВІД ЦІЛІ, ЩО ЛОЦУЄТЬСЯ ЗА МЕЖАМИ РАДІОБРІЮ НАД МОРЕМ

В.Д. Карлов, О.П. Кондратенко, О.К. Шейгас, Ю.Б. Ситник

У статті розроблений математичний апарат, що дозволяє по критерію максимуму логарифма відношення правдоподібності синтезувати алгоритм оптимального вимірювання доплеровської частоти сигналу, відбитого від мети, лоцуючої над морем за межами дальності прямої видимості. Особливістю даної статті є отримання шуканого алгоритму для довільної кореляційної функції флуктуації фази стосовно використання фазометричного методу вимірювання доплеровської частоти, відбитого від цілі сигналу.

**Ключові слова:** вимірник доплеровської частоти, ціль, що летить низько, радіобрії.

**TO THE QUESTION ABOUT MEASURING OF DOPPLER FREQUENCY SIGNAL REFLECTED  
FROM SPOT AFTER LIMITS OF RADIO HORIZON ABOVE SEA**

V.D. Karlov, A.P. Kondratenko, O.K. Sheygas, U.B. Citnik

*Mathematical instrument, allowing on the criterion of a maximum of logarithm of relation of verisimilitude to synthesize the algorithm of the optimum measuring of Doppler frequency of signal, reflected from a target, spot above a sea outside distance of line-of-sight is developed in the article. The feature of this article is a receipt of the sought after algorithm for the arbitrary cross-correlation function of fluctuation of phase as it applies to the use of phasometer method of measuring of Doppler frequency, signal reflected from a target.*

**Keywords:** measuring device of Doppler frequency, low-flying target, radio horizon.