

УДК 621.396.2.019.4

**ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ  
О СОСТОЯНИИ СТАТИСТИЧЕСКИ ШЕРОХОВАТОЙ  
ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ  
КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА**

**А. М. Бобрешов<sup>1</sup>, А. Д. Кононов<sup>2</sup>, А. А. Кононов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – Воронежский государственный университет;

<sup>2</sup> – Воронежский государственный технический университет

Поступила в редакцию 21.12.2022 г.

**Аннотация.** Проведена оценка влияния статистически шероховатой подстилающей поверхности на характеристики радиоэлектронных систем с повторным использованием частоты методами корреляционного анализа.

**Ключевые слова:** корреляционный анализ, информация о состоянии поверхности, статистические шероховатости.

**POSSIBILITIES OF OBTAINING STATISTICALLY ROUGH  
SURFACE CONDITION INFORMATION USING  
CORRELATION ANALYSIS METHODS**

**A. M. Bobreshov, A. D. Kononov, A. A. Kononov**

**Abstract.** The influence of the statistically rough underlying surface on the characteristics of radio-electronic systems with frequency reuse has been evaluated by correlation analysis methods.

**Keywords:** correlation analysis, surface condition information, statistical roughness.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих задачах, связанных с изучением свойств статистически шероховатых поверхностей (например, картографирование местности, прогнозирование погодных условий в районах рыбного промысла и т. п.) важно оперативное получение информации о состоянии и динамике характеристик морской поверхности. Эффекты рассеяния, возникающие при радиолокационном зондировании земных и морских шероховатых покровов, приводят к энергетическим потерям при приеме отраженных сигналов, ухудшающим информационную наблюдаемость подстилающих поверхностей и трудностям при отстройке от мешающих отражений [1–3].

Кроме того, при решении задач электромагнитной совместимости и оптимизации приема управляющих сигналов для функционирования объектов вблизи подстилающих поверхностей, весьма важно исследовать характер и степень ослабления колебаний для различных условий распространения [4].

Цель работы — оценить возможности получения информации о состоянии шероховатой морской поверхности с помощью методов корреляционного анализа [5].

## 2. ПОЛУЧЕНИЕ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА

При облучении статистически шероховатой поверхности монохроматическими колебаниями с летательного аппарата в режиме горизонтального полета отраженный сигнал может быть представлен в виде

$$U(\beta, \varphi, t) = \operatorname{Re} \left[ \dot{E}(\beta) e^{i2\pi f t} \right], \quad (1)$$

где  $\dot{E}(\beta) = E_0(\beta) e^{i\varphi}$  — комплексная амплитуда зондирующего сигнала;

$f = f_0 + f_1 + f_2$  — частота эхо-сигнала от зондируемого участка морской поверхности;

$f_0$  — излучаемая частота;

$f_1$  — частота Доплера, вызванная перемещением локатора относительно статистически шероховатой поверхности, равная

$$f_1 = \frac{2V_r}{\lambda_0} \cos \varphi \cdot \sin \beta, \quad (2)$$

$f_2$  — частота Доплера для модифицированного спектра волнения, вызванного движением морской поверхности [6]

$$f_2 = \frac{\theta \sqrt{L}}{\lambda_0} \sqrt{\frac{1}{2+m} \cdot \sin^2 \beta (1 + \cos^2 \varphi \cdot m) + \cos^2 \beta}, \quad (3)$$

$\lambda_0$  — длина излучаемой радиоволны;

$m, \theta$  — коэффициенты, определяемые условиями локации ( $m = 2 \dots 4$ ,  $\theta = 0.25 \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right]$ );

$L$  — средняя длина волны в отражающем участке морской поверхности;

$V_r$  — горизонтальная скорость полета летательного аппарата;

$\beta, \varphi$  — используемые в выражениях углы, показанные на рисунке.

Корреляционная функция отраженного сигнала (1) определяется выражением [6]

$$k(\tau) = \frac{E^2(\beta)}{2} \cos 2\pi f \tau. \quad (4)$$

При использовании на прием и передачу одной антенны угловое распределение мощности определяется выражением

$$W(\beta) = W_0 \cdot G^2(\beta) \cdot \sigma_0(\beta), \quad (5)$$

где  $W_0$  — коэффициент нормировки плотности мощности, определяемый параметрами приемно-передающего устройства;

$G(\beta)$  — диаграмма направленности приемно-передающей антенны;

$\sigma(\beta)$  — удельная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) участка поверхности.

Мощность парциального сигнала, отраженного от элемента поверхности площадью  $d\varphi \cdot d\beta$ , равна

$$E^2(\beta) = 2W_0 G^2(\beta) \cdot \sigma_0(\beta) \cdot d\varphi \cdot d\beta. \quad (6)$$

Следовательно,

$$k(\tau) = W_0 \cdot G^2(\beta) \cdot \sigma_0(\beta) \cdot \cos 2\pi f \tau. \quad (7)$$

Представив исследуемый участок поверхности в виде совокупности независимых случайных элементарных отражателей, получим выражение для корреляционной функции сигнала [7], отраженного от всей облучаемой поверхности

$$k(\tau) = W_0 \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} G^2(\beta) \cdot \sigma_0(\beta) \cdot \cos 2\pi f\tau d\beta. \quad (8)$$

В сантиметровом и миллиметровом диапазонах излучения, где практически всегда выполняется условие  $\frac{\sigma_h}{\lambda_0} \geq \frac{1}{4}$ , ( $\sigma_h$  — среднеквадратичная величина статистических шероховатостей),  $\sigma_0(\beta)$  можно [8] представить в виде

$$\sigma_0(\beta) = \exp\left(-\frac{tg^2\beta}{2\gamma_h^2}\right), \quad (9)$$

где  $\gamma_h = \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma_h}{l_h}$  — среднеквадратичный угол наклона морских волн;

$l_h$  — радиус корреляции поверхности,  $l_h \approx 0.2L$  [8].

Для случая пологих неровностей ( $0 < \gamma_h \leq 1$ ) предел интегрирования по  $\beta$  можно ограничить углом  $\frac{\pi}{2}$ , тогда  $\cos \beta \approx 1$  и  $tg^2\beta \approx \sin^2\beta$ . При этих допущениях формула (8) принимает вид

$$k(\tau) = W_0 \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp\left[-\left(\frac{2.76}{\beta_A^2} + \frac{1}{2\gamma_h^2}\right)\right] \sin^2\beta \cdot \cos^4\beta \cdot \cos 2\pi f\tau d\beta, \quad (10)$$

$\beta_A$  — соответствующий угол места в точке А (рис. 1).

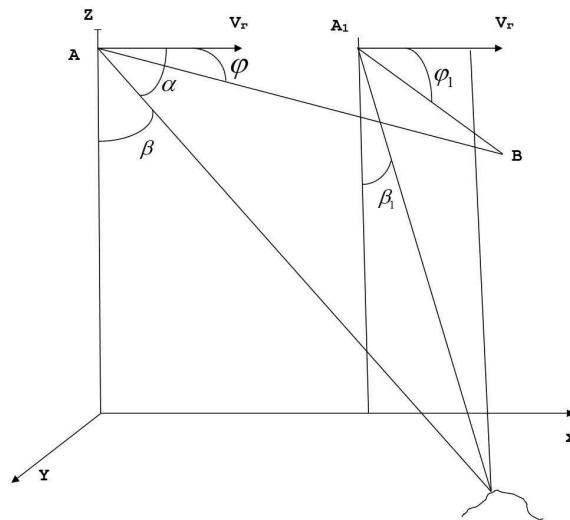


Рис. 1. Графическая иллюстрация рассеяния радиолокационного сигнала летательного аппарата в режиме горизонтального полета от статистически шероховатой подстилающей поверхности.

Обозначив  $p = \frac{2.76}{\beta_A^2} + \frac{1}{2\gamma_h^2}$ , осуществив замену переменной  $\beta = \arcsin z$  и выполнив интегрирование в (10), получаем

$$k(\tau) = 2\pi W_0 \cdot \cos\left[2\pi\tau\left(f_0 + \frac{0.25}{\lambda_0}\sqrt{L}\right)\right] \int_0^{\infty} e^{-pz^2} I_0\left(\frac{4\pi V_r \tau}{\lambda_0}\right) dz. \quad (11)$$

Для интеграла в (11) известно [9]

$$\int_0^{\infty} e^{-\alpha x^2} I_{\nu}(\beta x) dx = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{2\sqrt{\alpha}} e^{-\frac{\beta^2}{8\alpha}} I_{\frac{1}{2}\nu}\left(\frac{\beta^2}{8\alpha}\right),$$

и нормированная корреляционная функция примет вид

$$R(\tau) = e^{-\alpha\tau^2} I_0(\alpha \cdot \tau^2) \cos(\omega_0\tau + 0.25\tau k_0\sqrt{L}), \quad (12)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ;

$k_0$  — волновое число;

$I_0$  — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

$$\alpha = \frac{(k_0 V_r \theta_A \gamma_h)^2}{\theta_A^2 + 5.52 \gamma_h^2};$$

$\theta_A$  — азимутальный угол в точке А. При широкой ( $\theta_A \gg \gamma_h$ ) диаграмме направленности  $\alpha \approx k_0^2 V_r^2 \gamma_p^2$ .

Нормированная корреляционная функция огибающей на выходе линейного детектора приемника, согласно [6], связана с корреляционной функцией радиосигнала соотношением

$$\rho(\tau) \approx R^2(\tau). \quad (13)$$

Подставляя (12) в (13), получаем

$$\rho(\tau) = e^{-2\alpha\tau^2} I_0^2(\alpha\tau^2). \quad (14)$$

Таким образом, из (12) и (14) следует, что величина среднеквадратичного угла наклона морских волн определяет интервал корреляции отраженного от шероховатой поверхности радиосигнала, а движение элементарных рассеивателей морской поверхности приводит к смещению центральной частоты отраженного сигнала, величина которого определяется длиной морских волн.

Отсюда с помощью когерентного радиолокационного устройства СВЧ-диапазона, установленного на летательном аппарате, и с использованием вычислительных средств обработки получаемой информации можно по смещению центральной частоты и изменению формы огибающей корреляционной функции сигнала определить состояние исследуемого участка морской поверхности.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зависимости от наклона волн СВЧ-диапазона к подстилающей поверхности характер их в существенной степени определяется состоянием участка радиолокационного отражения, формой рабочей поверхности и многими другими факторами.

Информационные возможности селекции участков подстилающей поверхности снижаются при углах облучения, близких к нормали.

Отметим, что помехоустойчивость систем связи и локации с повторным использованием частоты существенно зависит от углов облучения, электрофизических свойств и степени шероховатости подстилающих поверхностей, а максимумы отношений сигнал/помеха имеют место вблизи псевдобрюстеровских углов, причем с увеличением степени шероховатости эта область для данного типа поверхности смещается в сторону больших углов скольжения.

Полученные результаты могут быть полезны при изучении возможностей оптимизации приема в системах связи и управления, использующих пространственно-временные характеристики сигналов, а также могут быть использованы при проектировании радиоизмерительных систем дистанционного зондирования при изучении информационных возможностей оперативных навигационных систем, позволяющих повысить точность измерений электрических характеристик в задачах радиолокационного наблюдения участков подстилающей поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникеенко, Г. Н. Оценка энергетических потерь при поляризационном приеме сигналов, рассеянных земной поверхностью / Г. Н. Аникеенко, А. Д. Кононов, В. В. Кузнецов // Радиотехника. — 1988. — № 4. — С. 78–84.
2. Аникеенко, Г. Н. Поляризационная селекция мешающих отражений от земли при передаче сигналов в СС ПИЧ / Г. Н. Аникеенко, А. Д. Кононов // Радиотехника. — 1987. — № 12. — С. 69–71.
3. Кононов, А. Д. Анализ статистической структуры частично поляризованных волн, отраженных от шероховатых подстилающих поверхностей / А. Д. Кононов, А. А. Кононов // Сб. научных трудов ВГЛТА. — 2003. — С. 198–201.
4. Кононов А.Д. Определение пространственно-временных характеристик сигнала, отраженного от статистически шероховатых подстилающих поверхностей / А. Д. Кононов, А. А. Кононов // Сб. научных трудов “Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления”. — 2002. — Вып. 7, ч. 1. — С. 291–293.
5. Кононов, А. Д. Анализ влияния отражений от статистически шероховатой поверхности на помехоустойчивость систем связи и управления с антеннами ортогональной поляризации / А. Д. Кононов, А. А. Кононов // Научный вестник ВГТУ. Серия Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. — 2017. — Вып. 2(10). — С. 34–37.
6. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. — М. : “Сов. радио”, 1975. — 393 с.
7. Зубкович, С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности / С. Г. Зубкович. — М. : “Сов. радио”, 1968. — 224 с.
8. Канарейкин, Д. Б. Морская поляриметрия / Д. Б. Канарейкин, В. А. Потехин, И. Ф. Шишкин. — Л. : “Судостроение”, 1968. — 328 с.
9. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. — М. : Физматгиз, 1963. — 1100 с.

## REFERENCES

1. Anikeenko G.N., Kononov A.D., Kuznetsov V.V. Estimation of energy losses during polarization reception of signals scattered by the Earth's surface. [Anikeenko G.N., Kononov A.D., Kuznetsov V.V. Ocenka energeticheskikh poter' pri polarizacionnom prieme signalov, rasseyannykh zemnoy poverhnost'yu]. *Radiotekhnika — Radio Engineering*, 1988, no. 4, pp. 78–84.
2. Anikeenko G.N., Kononov A.D. Polarizing selection of interfering reflections from the ground during signals transmission in the FRCS. [Anikeenko G.N., Kononov A.D. Polyarizacionnaya selekciya meshayushchih otrazhenij ot zemli pri peredache signalov v SS PICH]. *Radiotekhnika — Radio Engineering*, 1987, no. 12, pp. 69–71.
3. Kononov A.D., Kononov A.A. Analysis of the statistical structure of partially polarized waves reflected from rough underlying surfaces. [Kononov A.D., Kononov A.A. Analiz statisticheskoy struktury chastichno polyarizovannykh voln, otrazhennykh ot sherohovatykh podstilayushchih

poverhnostej]. In the Collection of Scientific Papers of VSFEA, 2003, pp. 198–201.

4. Kononov A.D., Kononov A.A. Determination of the spatio-temporal characteristics of the signal reflected from statistically rough underlying surfaces. [Kononov A.D., Kononov A.A. Opredelenie prostranstvenno-vremennykh harakteristik signala, otrazhennogo ot statisticheski sherohovatykh podstilayushchih poverhnostej]. In the Collection of Scientific Papers “Mathematical modeling, computer optimization of technologies, equipment parameters and control systems”, 2002, no. 7, part 1, pp. 291–293.

5. Kononov A.D., Kononov A.A. Analysis of the effect of reflections from a statistically rough surface on the noise immunity of communication and control systems with orthogonal polarization antennas. [Kononov A.D., Kononov A.A. Analiz vliyaniya otrazhenij ot statisticheski sherohovatoj poverhnosti na pomekhoustojchivost' sistem svyazi i upravleniya s antennami ortogonal'noj polyarizacii]. *Nauchnyj vestnik VGTU. Seriya Informacionnye tekhnologii v stroitel'nyh, social'nyh i ekonomicheskikh sistemah — Scientific Bulletin of VSTU, Series: Information technologies in construction, social and economic systems*, 2017, no. 2(10), pp. 34–37.

6. Levin B.R. Theoretical foundations of statistical radio engineering. [Levin B.R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki]. Moscow: Soviet Radio, 1975, 393 p.

7. Zubkovich S.G. Statistical characteristics of radio signals reflected from the Earth's surface. [Zubkovich S.G. Statisticheskie harakteristiki radiosignalov, otrazhennykh ot zemnoj poverhnosti]. Moscow: Soviet Radio, 1968, 224 p.

8. Kanareykin D.B., Potehin V.A., Shishkin I.F. Marine polarimetry. [Kanarejkin D.B., Potekhin V.A., SHishkin I.F. Morskaya polyarimetriya]. Leningrad: Shipbuilding, 1968, 328 p.

9. Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. Table of Integrals, Series, and Products. [Gradshtejn I.S., Ryzhik I.M. Tablicy integralov, summ, ryadov i proizvedenij]. Moscow: Fizmatgiz, 1963, 1100 p.

*Бобрешов Анатолий Михайлович, д.ф.-м.н., проф. кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия*  
*E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru*  
*Тел.: +7-473-220-82-84*

*Bobreshov Anatoly Mikhailovich, Doctor of phys.-math. sciences, Professor of the dept. of electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia*  
*E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru*  
*Tel.: +7-473-220-82-84*

*Кононов Александр Давыдович, к.ф.-м.н., проф. кафедры систем управления и информационных технологий в строительстве Воронежского государственного технического университета, Воронеж, Россия*  
*E-mail: sovet\_femit@mail.ru*

*Kononov Alexandr Davydovich, Candidate of phys.-math. sciences, Professor of the dept. of control systems and information technologies in construction, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia*  
*E-mail: sovet\_femit@mail.ru*

*Кононов Андрей Александрович, д.т.н., проф. кафедры систем управления и информационных технологий в строительстве Воронежского государственного технического университета, Воронеж, Россия*  
*E-mail: kniga126@mail.ru*

*Kononov Andrey Alexandrovich, Doctor of technical sciences, Professor of the dept. of control systems and information technologies in construction, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia*  
*E-mail: kniga126@mail.ru*