

УДК 530.1; 528.88

В.А. Миронов

Институт радиопизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА ВЫБРОСОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА ОТРАЖЕННОГО ОТ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В работе приведены результаты экспериментального исследования статистических характеристик сигналов, отраженных от морской поверхности при малых углах скольжения. При этом использовались радиолокационные станции, работающие на горизонтальной поляризации и длинах волн 10,6 см, 3,2 см и 2 см. Приведены зависимости числа выбросов от направления распространения морских волн по отношению к направлению излучения зондирующего сигнала и уровня волнения моря.

Ключевые слова: *отраженный сигнал, морская поверхность, дисперсия числа выбросов.*

Введение

На практике большой интерес для построения алгоритмов борьбы с пассивными помехами в системах автоматического сопровождения целей представляет обработка радиолокационных сигналов,

отраженных от морской поверхности при углах скольжения менее $\varphi < 2^\circ$. Трудность в учете условий распространения радиоволн, состояния морской поверхности и множества других факторов, ограничивающих применение математических моделей в конкретной обстановке, потребовали определения ста-

Исследования, проведенные в [1 – 4] позволили получить основные статистические характеристики выбросов отраженного сигнала, в частности распределение максимальных эффективных поверхностей рассеяния (ЭПР) и длительностей выбросов. Там же отмечено, что вероятность появления выбросов с большими значениями ЭПР при горизонтальной поляризации выше, чем при вертикальной поляризации. Наиболее вероятные значения ЭПР лежат в пределах не менее $0,1 - 0,2 \text{ м}^2$, при этом максимальные значения достигают $0,5 - 1 \text{ м}^2$. С уменьшением угла скольжения происходит возрастание максимальных значений ЭПР выбросов, что в свою очередь накладывает более жесткие требования к устройствам селекции пассивных помех. Для определения зависимости количественных значений основных статистических характеристик выбросов от условий наблюдения и параметров зондирующих сигналов проведены экспериментальные исследования сигналов радиолокационных станций (РЛС), отраженных от морской поверхности в диапазонах длин волн $\lambda = 10,6 \text{ см}$, $\lambda = 3,2 \text{ см}$ и $\lambda = 2 \text{ см}$.

Основной материал

1. Распределение числа выбросов на $\lambda = 2 \text{ см}$. Экспериментальные исследования числа выбросов проводились в условиях волнения моря от 2 до 5 баллов. Для каждой интенсивности волнения моря обрабатывалось по $M = 500$ реализаций с длительностью $T = 7,5 \text{ мкс}$, что составляло примерно 3×10^3 выбросов помех от моря при каждом измерении. Результаты исследований представлены на рис. 1, 2 в виде гистограмм распределения числа выбросов при разных пороговых

уровнях в длинноволновом миллиметровом диапазоне радиоволн при волнении моря 2–3 и 5 баллов.

В табл. 1, 2 приведены среднее число выбросов $\overline{n_T}$, дисперсия ε_{nT}^2 , коэффициент вариации $\varepsilon_{nT} / \overline{n_T}$, а также точность и надежность оценок для среднего числа выбросов при различном волнении моря.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- с увеличением интенсивности волнения моря среднее число выбросов увеличивается;
- при увеличении порогового уровня C среднее число выбросов уменьшается;
- если при низких пороговых уровнях распределение является симметричным относительно $\overline{n_T}$ и близко к гауссовскому закону распределения, то с увеличением C гистограммы смещаются в сторону меньших значений $\overline{n_T}$, причем само распределение для достаточно больших C близко к закону Пуассона.

На рис. 3 приведены графики зависимости среднего числа выбросов в реализациях, отраженных от морской поверхности, в зависимости от порогового уровня C при волнении моря 2 – 3 и 5 баллов на $\lambda = 3,2 \text{ см}$ и $\lambda = 2 \text{ см}$. Приведенные данные показывают, что на $\lambda = 2 \text{ см}$ среднее число выбросов при $C = 0,5$ и волнении моря 5 баллов примерно в 1,2 раза больше, чем при волнении моря 2 – 3 балла. При больших пороговых уровнях ($C \geq 2$) среднее число выбросов на $\lambda = 2 \text{ см}$ и волнении моря 5 баллов примерно в 2 раза больше, чем при волнении 2 – 3 балла. Таким образом, с увеличением интенсивности волнения моря среднее число выбросов увеличивается, но незначительно.

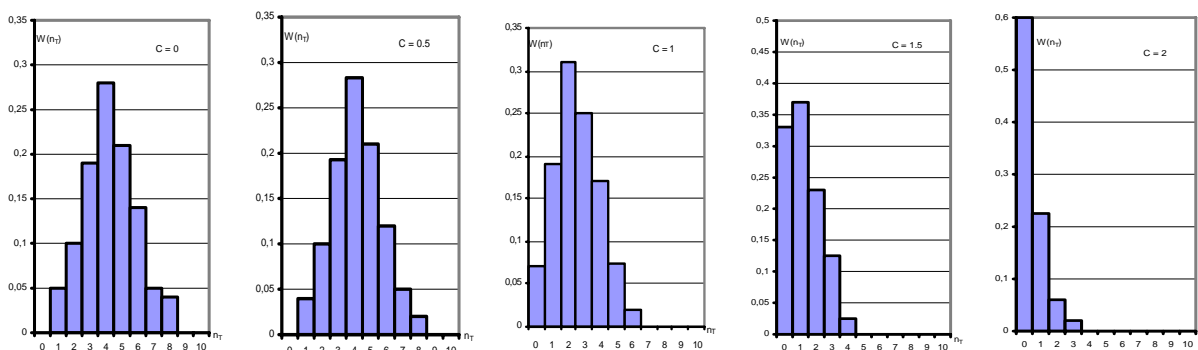


Рис. 1. Гистограммы распределения реализаций сигналов по числу выбросов при различных пороговых уровнях C на $\lambda = 2 \text{ см}$ и волнении моря 2–3 балла

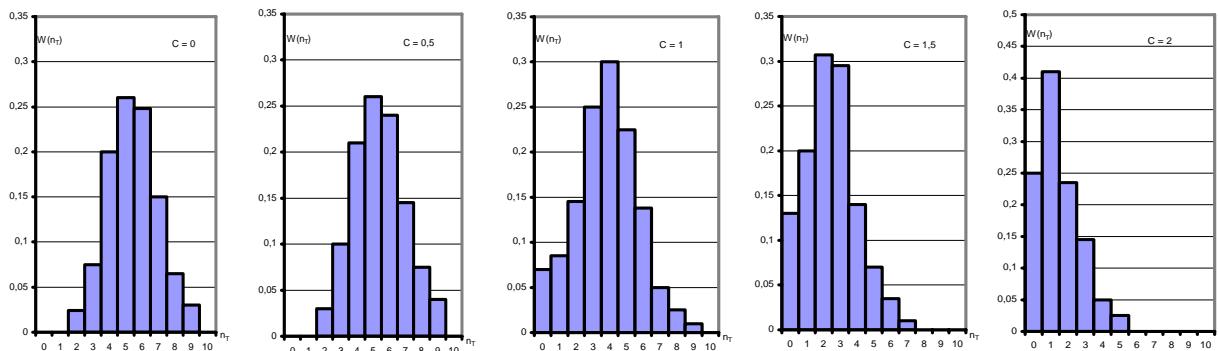


Рис. 2. Гистограммы распределения реализаций сигналов по числу выбросов при различных пороговых уровнях C на $\lambda = 2 \text{ см}$ и волнении моря 5 баллов

Таблица 1

Значения \bar{n}_T , ε_{nT}^2 , $\varepsilon_{nT}/\bar{n}_T$, $p_{\text{дов}}$ на различных пороговых уровнях в миллиметровом диапазоне радиоволн и волнении моря 2–3 балла

C	\bar{n}_T	ε_{nT}^2	$\varepsilon_{nT}/\bar{n}_T$	$\bar{n}_T \pm \chi$, $p_{\text{дов}} = 0,95$
0	4,274	2,355	0,359	$\bar{n}_T \pm 0,03$
0,5	4,164	2,230	0,358	$\bar{n}_T \pm 0,031$
1	2,490	1,80	0,538	$\bar{n}_T \pm 0,027$
1,5	1,162	1,50	0,860	$\bar{n}_T \pm 0,028$
2	0,318	0,350	1,186	$\bar{n}_T \pm 0,013$

Таблица 2

Значения \bar{n}_T , ε_{nT}^2 , $\varepsilon_{nT}/\bar{n}_T$, $p_{\text{дов}}$ на различных пороговых уровнях в миллиметровом диапазоне радиоволн и волнении моря 5 баллов

C	\bar{n}_T	ε_{nT}^2	$\varepsilon_{nT}/\bar{n}_T$	$\bar{n}_T \pm \chi$, $p_{\text{дов}} = 0,95$
0	5,11	2,50	0,31	$\bar{n}_T \pm 0,036$
0,5	5,08	2,11	0,29	$\bar{n}_T \pm 0,033$
1	4,18	1,08	0,24	$\bar{n}_T \pm 0,027$
1,5	2,24	1,99	0,63	$\bar{n}_T \pm 0,022$
2	1,38	1,32	0,83	$\bar{n}_T \pm 0,001$

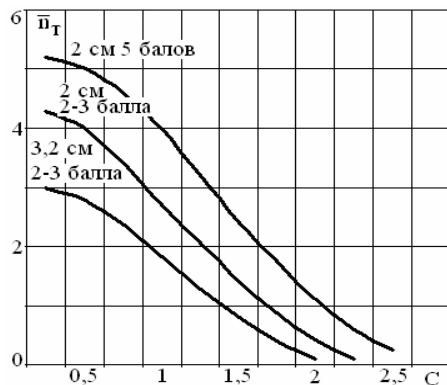


Рис. 3. Зависимость среднего числа выбросов в реализациях сигналов, отраженных поверхностью моря, от порогового уровня C на $\lambda = 3,2$ см и $\lambda = 2$ см

Если за начальный уровень принять среднее число выбросов при волнении моря 2 – 3 балла, то это увеличение (по сравнению с начальным уровнем) будет тем больше, чем выше уровень порога. Это объясняется различием амплитуд выбросов при различных интенсивностях волнения моря.

На рис. 4 приведены графики зависимости дисперсии числа выбросов ε_{nT}^2 от порогового уровня при различном волнении моря.

Из рисунка видно, что с увеличением уровня порога дисперсия числа выбросов уменьшается, а с увеличением интенсивности волнения моря дисперсия увеличивается. При низких пороговых уровнях отношение дисперсии числа выбросов при волнении

моря 5 баллов к дисперсии числа выбросов при волнении 2 – 3 балла примерно равно единице. С увеличением порогового уровня это отношение увеличивается и на уровне C = 2 равно четырем.

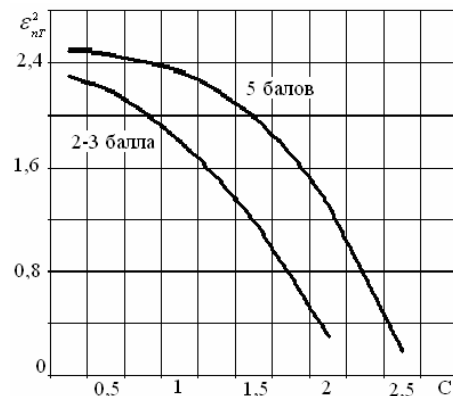


Рис. 4. Зависимость дисперсии ε_{nT}^2 числа выбросов в реализациях сигналов, отраженных поверхностью моря, от порогового уровня (волнение моря 2 – 3 и 5 баллов)

2. Зависимость распределения числа выбросов от направления распространения морских волн. На рис. 5 – 7 представлены гистограммы распределения числа выбросов на волне $\lambda = 2$ см на различных пороговых уровнях C при направлении излучения против морских волн, вдоль морских волн, вслед морским волнам.

Из представленных данных видно, что при излучении радиоволн вслед морским волнам и вдоль морских волн гистограммы смещены в сторону больших значений числа выбросов \bar{n}_T относительно гистограмм, полученных при направлении излучения против морских волн. В табл. 3 – 5 приведены среднее число выбросов \bar{n}_T , дисперсия ε_{nT}^2 , коэффициент вариации $\varepsilon_{nT}/\bar{n}_T$, а также точность и надежность оценок для среднего числа выбросов в различных условиях наблюдения.

На рис. 8 приведены графики зависимости среднего числа выбросов \bar{n}_T от угла Φ между направлением излучения радиоволн и распространения морских волн при различных уровнях порога. Из рисунка следует, что среднее число выбросов сигналов, отраженных поверхностью моря, существенно зависит от этого угла. Максимальное значение среднего числа выбросов наблюдается при направлении излучения вслед морских волн ($\Phi = 180^\circ$). На низких пороговых уровнях среднее число выбросов при направлении излучения вслед морских волн примерно в два раза больше, чем при направлении излучения против морских волн ($\Phi = 0^\circ$). С увеличением порогового уровня это соотношение сохраняется. На рис. 9 приведены графики зависимости дисперсии ε_{nT}^2 числа выбросов от уровня порога при различных направлениях излучения и распространения морских волн.

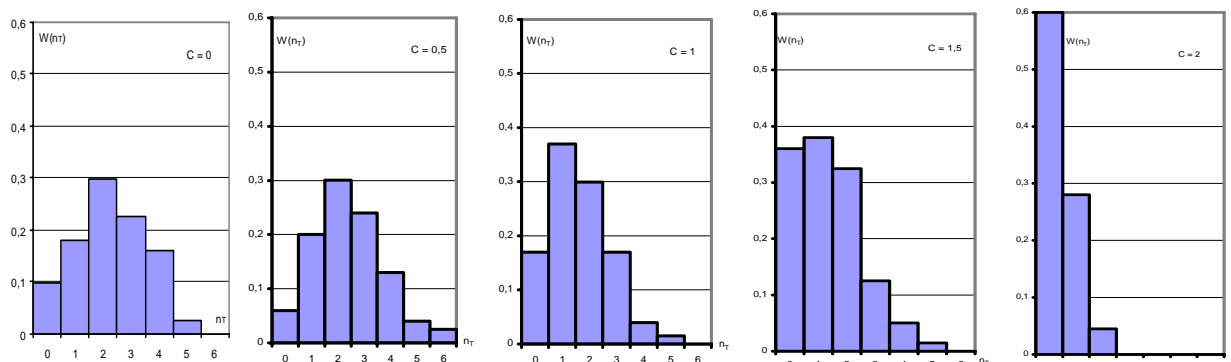


Рис. 5. Гистограммы распределения реализаций сигналов по числу выбросов (направление излучения – против волн, волнение моря 2 – 3 балла, $\lambda = 2$ см)

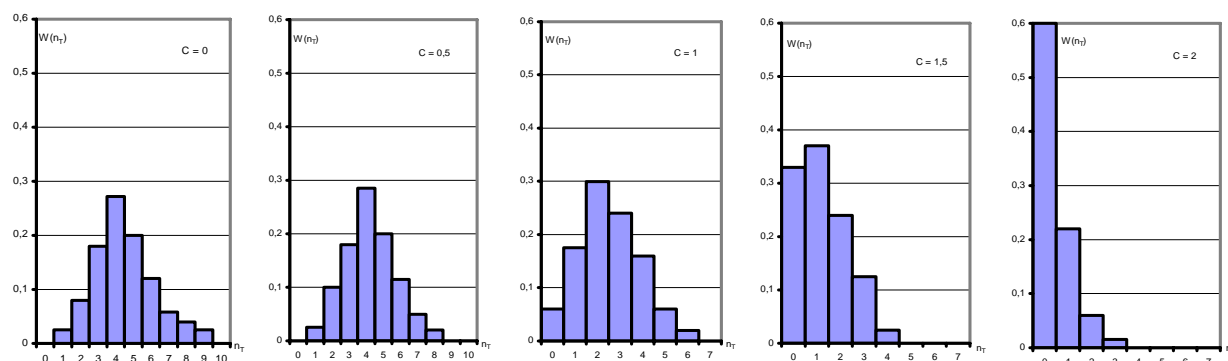


Рис. 6. Гистограммы распределения реализаций сигналов по числу выбросов (направление излучения – вдоль волн, волнение моря 2 – 3 балла, $\lambda = 2$ см)

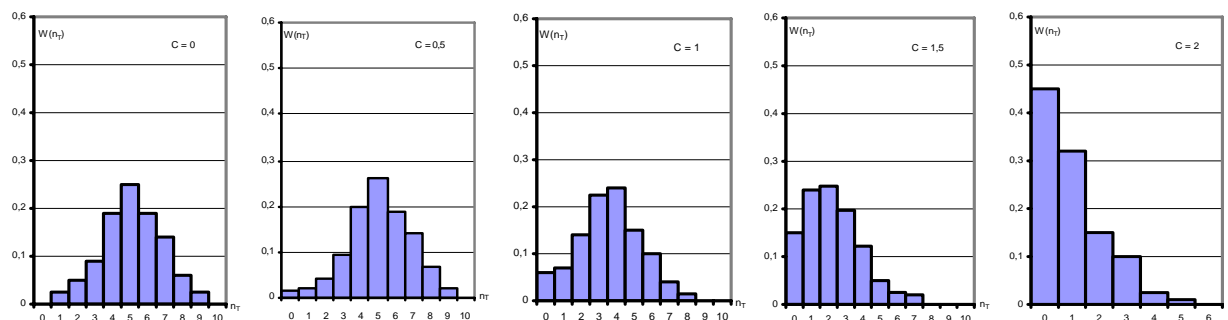


Рис. 7. Гистограммы распределения реализаций сигналов по числу выбросов (направление излучения – вслед волнам, волнение моря 2 – 3 балла, $\lambda = 2$ см)

Таблица 3

Значения $\overline{n_T}$, ε_{nT}^2 , $\varepsilon_{nT} / \overline{n_T}$, $\rho_{\text{дов}}$ на $\lambda = 2$ см, при различных пороговых уровнях, против морских волн и волнении моря 2 – 3 балла

C	$\overline{n_T}$	ε_{nT}^2	$\varepsilon_{nT} / \overline{n_T}$	$\overline{n_T} \pm \chi$, $\rho_{\text{дов}} = 0,95$
0	2,490	1,718	0,526	$\overline{n_T} \pm 0,021$
0,5	2,296	1,609	0,553	$\overline{n_T} \pm 0,021$
1	1,462	1,005	0,684	$\overline{n_T} \pm 0,002$
1,5	0,778	0,673	0,105	$\overline{n_T} \pm 0,023$
2	0,348	0,310	1,60	$\overline{n_T} \pm 0,007$

Результаты показывают, что дисперсия числа выбросов при всех направлениях распространения морских волн с увеличением C уменьшается.

Таблица 4

Значения $\overline{n_T}$, ε_{nT}^2 , $\varepsilon_{nT} / \overline{n_T}$, $\rho_{\text{дов}}$ на $\lambda = 2$ см, при различных пороговых уровнях, вдоль морских волн и волнении моря 2 – 3 балла

C	$\overline{n_T}$	ε_{nT}^2	$\varepsilon_{nT} / \overline{n_T}$	$\overline{n_T} \pm \chi$, $\rho_{\text{дов}} = 0,95$
0	4,27	2,36	0,36	$\overline{n_T} \pm 0,03$
0,5	4,16	2,23	0,36	$\overline{n_T} \pm 0,031$
1	2,49	1,80	0,54	$\overline{n_T} \pm 0,027$
1,5	1,16	1,15	0,86	$\overline{n_T} \pm 0,028$

Максимальное значение дисперсии числа выбросов наблюдается при направлении излучения вслед морской волне.

Таблица 5

Значения \bar{n}_T , ε_{nT}^2 , $\varepsilon_{nT}/\bar{n}_T$, $p_{дов}$ на $\lambda = 2$ см, вслед морским волнам и волнении моря 2 – 3 балла

C	\bar{n}_T	ε_{nT}^2	$\varepsilon_{nT}/\bar{n}_T$	$\bar{n}_T \pm \chi$, $p_{дов} = 0,95$
0	4,97	4,15	0,40	$\bar{n}_T \pm 0,033$
0,5	4,95	3,55	0,376	$\bar{n}_T \pm 0,036$
1	3,64	3,15	0,494	$\bar{n}_T \pm 0,037$
1,5	2,20	2,60	0,727	$\bar{n}_T \pm 0,046$
2	0,95	1,20	1,152	$\bar{n}_T \pm 0,052$

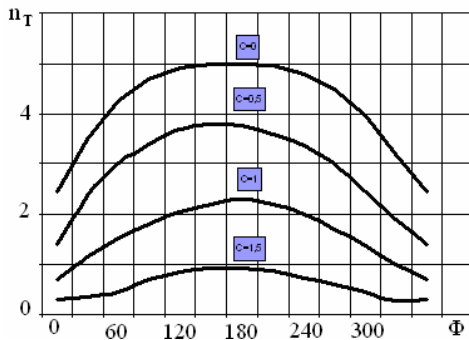


Рис. 8. Зависимость \bar{n}_T от направления распространения морских волн ($\Phi = 0$ направление излучения против морских волн, волнение моря 2 – 3 балла)

3. Распределение числа выбросов на $\lambda = 3,2$ см и $\lambda = 10,6$ см. Гистограммы распределения числа выбросов на $\lambda = 3,2$ см представлены на рис. 10, 11, а в табл. 6, 7 приведены среднее число выбросов \bar{n}_T , дисперсия ε_{nT}^2 , коэффициент вариации $\varepsilon_{nT}/\bar{n}_T$, а также точность и надежность оценок для среднего числа выбросов в различных условиях наблюдения при $\lambda = 10,6$ см и $\lambda = 3,2$ см. Полученные экспериментальные данные показывают, что при низких пороговых уровнях среднее число выбросов сигналов при $\lambda = 10,6$ см примерно в 1,5 раза больше, чем при $\lambda = 3,2$ см, следовательно гистограммы распределения выбросов при $\lambda = 10,6$ см смещены в сторону больших значений \bar{n}_T .

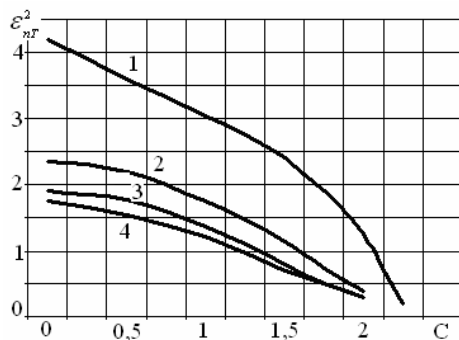


Рис. 9. Зависимость дисперсии ε_{nT}^2 числа выбросов от C при различных направлениях излучения и распространения морских волн (1 – направление излучения вслед волнам, 2 – вдоль волн, 3 – под углом 30° к фронту волн, 4 – против волн)

Таблица 6

Значения \bar{n}_T , ε_{nT}^2 , $\varepsilon_{nT}/\bar{n}_T$, $p_{дов}$ на $\lambda = 3,2$ см, при различных пороговых уровнях и волнении моря 2 – 3 балла

C	\bar{n}_T	ε_{nT}^2	$\varepsilon_{nT}/\bar{n}_T$	$\bar{n}_T \pm \chi$, $p_{дов} = 0,95$
0	3,14	1,92	0,442	$\bar{n}_T \pm 0,026$
0,5	2,94	1,91	0,47	$\bar{n}_T \pm 0,026$
1	1,79	1,42	0,69	$\bar{n}_T \pm 0,025$
1,5	0,80	0,72	2,06	$\bar{n}_T \pm 0,01$
2	0,19	0,20	2,35	$\bar{n}_T \pm 0,008$

Таблица 7

Значения \bar{n}_T , ε_{nT}^2 , $\varepsilon_{nT}/\bar{n}_T$, $p_{дов}$ на $\lambda = 10,6$ см, при различных пороговых уровнях и волнении моря 2 – 3 балла

C	\bar{n}_T	ε_{nT}^2	$\varepsilon_{nT}/\bar{n}_T$	$\bar{n}_T \pm \chi$, $p_{дов} = 0,95$
0	4,67	2,59	0,34	$\bar{n}_T \pm 0,031$
0,5	4,58	2,38	0,34	$\bar{n}_T \pm 0,032$
1	2,19	1,94	0,64	$\bar{n}_T \pm 0,022$
1,5	0,51	0,50	1,37	$\bar{n}_T \pm 0,012$
2	0,17	0,30	3,23	$\bar{n}_T \pm 0,008$

С увеличением порогового уровня уменьшается как среднее число выбросов, так и дисперсия числа выбросов, причем среднее число выбросов при $\lambda = 10,6$ см и при больших пороговых уровнях становится меньше, чем среднее число выбросов в диапазоне $\lambda = 3,2$ см. Объясняется это тем, что амплитуды выбросов помех от моря при $\lambda = 10,6$ см меньше чем при $\lambda = 3,2$ см.

На рис. 12 показаны зависимости дисперсии числа выбросов от порогового уровня, из которых следует, что при низких C отношение дисперсии при $\lambda = 10,6$ см к дисперсии при $\lambda = 3,2$ см примерно равно 1,3. При увеличении уровня порога это отношение уменьшается и при достаточно больших C становится меньше единицы.

4. Зависимость среднего числа выбросов от дальности. Зависимость среднего числа выбросов от дальности на длине волны $\lambda = 2$ см, при волнении моря 2 – 3 и 5 баллов представлены на рис. 13.

Из рисунка следует, что на малых дальностях среднее число выбросов \bar{n}_T при волнении моря 2 – 3 балла мало отличается от значения \bar{n}_T при волнении моря 5 баллов. С увеличением дальности до облучаемой площадки поверхности моря среднее число выбросов при волнении 2 – 3 балла уменьшается значительно быстрее, чем при волнении 5 баллов.

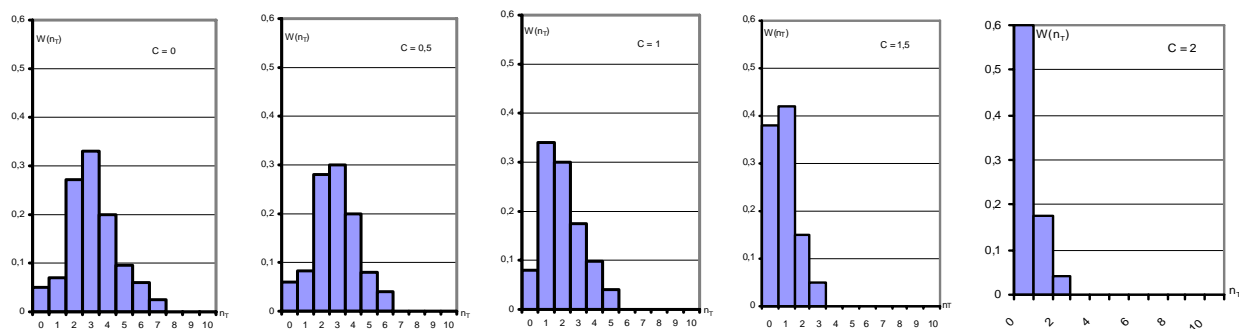


Рис. 10. Гистограммы распределения реализаций сигналов отраженных поверхностью моря по числу выбросов (волнение моря 2 – 3 балла, $\lambda = 3,2$ см)

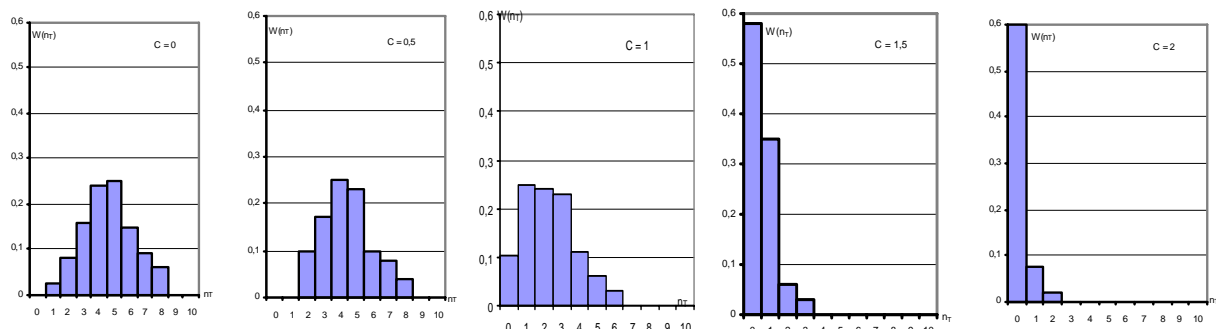


Рис. 11. Гистограммы распределения реализаций сигналов, отраженных поверхностью моря по числу выбросов (волнение моря 2 – 3 балла, $\lambda = 10,6$ см)

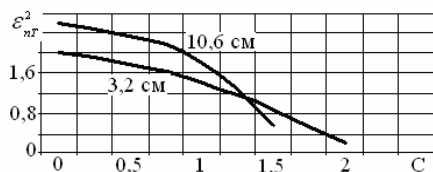


Рис. 12. Зависимость дисперсии числа выбросов от порогового уровня ($\lambda = 3,2$ см, $\lambda = 10,6$ см)

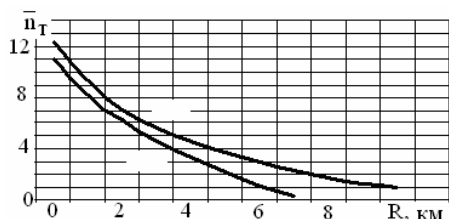


Рис. 13. Зависимость среднего числа выбросов сигналов, отраженных поверхностью моря, от дальности (волнение моря 2 – 3 и 5 баллов, $\lambda = 2$ см)

Выводы

1. Приведены результаты статистической обработки сигналов, отраженных от морской поверхности на длинах волн 10 см, 3 см, 2 см.

2. Построены гистограммы, иллюстрирующие распределение реализаций сигналов по числу

выбросов для различных пороговых уровней при волнении моря от 2 до 5 баллов.

3. Проведена оценка среднего числа выбросов отраженного сигнала и их дисперсии, а также точность и надежность оценок.

4. Показано, что при излучении радиоволн вслед и вдоль морских волн среднее число выбросов больше, чем при излучении против движения волн.

Список литературы

1. Зубкович С.Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности / С.Г. Зубкович. – М.: Сов. радио, 1968. – 244 с.
2. Дремлюк В.В. Использование судового радиолокатора для определения элементов морского волнения / В.В. Дремлюк // Океанология. – 1969. – Т. 9, № 4. – С. 707-710.
3. Гарнакерьян А.А. Радиолокация морской поверхности / А.А. Гарнакерьян, С.А. Сосунов. – Ростов на Дону: Ростовский университет, 1978. – 143 с.
4. Кулемин Г.П. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами / Г.П. Кулемин, В.Б. Разказовский. – К. Наук. думка, 1987. – С. 186-193.

Поступила в редколлегию 11.04.2009

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

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ КІЛЬКОСТІ ВИКИДІВ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СИГНАЛУ, ВІДБИТОГО ВІД МОРСЬКОЇ ПОВЕРХНІ

В.А. Миронов

В роботі приведені результати експериментального дослідження статистичних характеристик сигналів, відбитих від поверхні моря при малих кутах ковзання. При цьому використовувались радіолокаційні станції, які працюють на горизонтальній поляризації і довжинах хвиль 10,6 см, 3,2 см та 2 см. Представлені залежності кількості викидів від рівня та напрямку руху морських хвиль по відношенню до напрямку випромінювання зондуючого сигналу.

Ключові слова: відбитий сигнал, морська поверхня, середня кількість та дисперсія кількості викидів.

**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF DISTRIBUTING OF NUMBER OF THE TROOP LANDINGS
OF RADIO-LOCATION SIGNAL REFLECTED OT A MARINE SURFACE**

V.A. Mironov

The results of experimental research of statistical descriptions of signals, reflected on a marine surface at the small corners of sliding are resulted in work. The stations of radio-locations, workings on horizontal polarization and wave-lengths 10,6 see, 3,2 see and 2 see, were thus used Dependences of number of the troop landings are resulted on direction of distribution of marine waves in relation to direction of radiation of sounding signal and level of agitation exterminating.

Keywords: *reflected signal, marine surface, middle amount and dispersion of number of the troop landings.*