

## Статистика всплесков рассеянных морем сигналов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн

В. Г. Гутник, Г. П. Кулемин<sup>1</sup>, Л. И. Шарапов

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4*

<sup>1</sup>*Институт радиофизики и электроники НАН Украины,  
Украина, 61085, г. Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12*

*Статья поступила в редакцию 12 апреля 2000 г.*

Представлены результаты исследования параметров всплесков сигналов, рассеянных морской поверхностью в условиях обрушения, в диапазоне частот 10–140 ГГц. Проведено сравнение этих параметров с характеристиками выбросов морской поверхности над некоторой границей. Показано, что физическим механизмом образования всплесков является обратное рассеяние на брызгах, создаваемых обрушивающимися морскими волнами.

Представлено результати досліджень сплесків сигналів, розсіяних морською поверхнею в умовах обрушення, в діапазоні частот 10–140 ГГц. Проведено порівняння цих параметрів з характеристиками викидів морської поверхні над деякою межею. Показано, що фізичним механізмом утворення сплесків є зворотне розсіювання на бризках, які виникають внаслідок обрушення морських хвиль.

### Введение

Обратное рассеяние радиоволн СВЧ морской поверхностью при малых углах скольжения имеет ряд особенностей. Прежде всего, с уменьшением угла скольжения большая часть поверхности оказывается в области тени, а отраженный сигнал из пространственно-непрерывного превращается в дискретный, т. к. формируется лишь участками поверхности, выходящими из зоны тени. В этих условиях теряет свое значение понятие удельной эффективной поверхности рассеяния (ЭПР), относящееся лишь к однородной поверхности с равномерным освещением, т. к. отраженный сигнал формируется лишь локальными областями морской поверхности. Кроме того, даже при больших величинах угла скольжения, кроме непрерывного по дальности отраженного сигнала, наблюдаются его “всплески”, имеющие специфические статистические свойства. При этом морское волнение нельзя рассматривать как стационарный случайный процесс, а в отраженном сигнале можно четко выделить две фазы: “всплески” отраженного сигнала, интенсивность которых заметно превышает средний уровень, и паузы, когда уровень рассеянного сигнала оказывается значительно ниже, а при очень малых углах скольжения отсутствует из-за затенения поверхности. В настоящее время нет строгой физической модели появления таких “всплесков”, что не позволяет достоверно объяснить их статистику. Отмечается лишь, что пространственная статистика “всплесков” достаточно жестко связана с появлением обруши-

вающих волн, сопровождаемых появлением участков пены на морской поверхности.

Для объяснения природы появления всплесков рассеянных морем сигналов СВЧ диапазона в настоящее время достаточно широко анализируются четыре модели радиолокационного рассеяния:

– обратное рассеяние “блестящими” точками, хаотически расположенными на морской поверхности;

– обратное рассеяние на капельно-брызговой фракции, образующейся при обрушении морских волн и создающей некоторый слой брызг вблизи поверхности;

– краевая дифракция на гребнях морских волн;

– обратное рассеяние на угловых образованиях, появляющихся при обрушении морской волны, в частности, на образованиях типа “четверть цилиндра на плоскости”.

Фактически все проведенные эксперименты по радиолокационному наблюдению всплесков с той или иной степенью достоверности укладываются в рамки этих моделей, не позволяя отдать явного предпочтения какой-либо из них.

В рамках всех моделей удельная ЭПР морской поверхности в пределах ячейки разрешения определяется следующими физическими причинами. Во-первых, для каждого  $n$ -го участка поверхности, находящегося в освещенной зоне, величина удельной ЭПР определяется общими закономерностями обратного рассеяния морской поверхностью, полученными для непрерывного отраженного сигнала без учета затенений. Во-вторых,

существенное влияние оказывает пространственная статистика "всплесков", определяющая число членов при суммировании. Следовательно,

$$\sigma^0 = \sigma_{sea}^0 + \sigma_{sp}^0, \quad (1)$$

где  $\sigma^0$  – суммарная удельная ЭПР,  $\sigma_{sea}^0$  – удельная ЭПР морской поверхности,  $\sigma_{sp}^0$  – удельная ЭПР всплесков.

Распределение удельной ЭПР  $\sigma^0$  в этом случае является функцией пространства  $(x, y)$  и времени  $(t)$ . В пределах каждого "всплеска" изменение удельной ЭПР можно пронормировать на некоторое среднее значение  $m$ , меняющиеся в пространстве, а изменение пространственных свойств  $m$  характеризуется плотностью распределения вероятности  $p(m)$ . Тогда полная плотность вероятности равна

$$p(\sigma^0) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\sigma^0 / m) \cdot p(m) dm, \quad (2)$$

где  $p(\sigma^0 / m)$  – условная плотность вероятности для одного "всплеска" отраженного сигнала.

В общем случае последнее выражение характеризует пространственно-временное распределение ЭПР и позволяет определить вероятность некоторого значения ЭПР в пределах дальности действия и сектора обзора РЛС. Понятно, что пространственная статистика  $p(m)$  определяется статистикой выбросов случайной морской поверхности над некоторым порогом, поэтому прежде всего необходимо определить эту статистику.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований статистики всплесков рассеянных морем сигналов, проведенных в широком диапазоне частот от 10 до 140 ГГц. Кроме данных о статистике всплесков, распределении длительностей всплесков и пауз, эти результаты, на наш взгляд, позволяют уточнить физический механизм образования всплесков.

В связи с тем, что всплески достаточно жестко связаны с процессами обрушения морских волн, рассмотрим вначале характеристики выбросов взволнованной морской поверхности над некоторой границей.

#### Характеристики выбросов морской поверхности над заданной границей

Рассмотрим вопрос о превышении морской волной некоторой границы, воспользовавшись характеристиками морского волнения. В первом приближении морское волнение может быть представлено как стационарный диффе-

ренцируемый случайный процесс с конечным вторым спектральным моментом и непрерывным спектром на всех стадиях до фазы обрушения волны. Для таких случайных процессов имеется достаточно хорошо разработанная теория выбросов [1,2], которой мы воспользуемся для проведения оценок.

Общее выражение для оценки распределения числа пересечений этим процессом некоторого уровня  $\xi_0$  на интервале  $[0, T]$  представляет бесконечную сумму от интегралов неограниченно возрастающей кратности, поэтому его использование для практических расчетов затруднено [2]. Поэтому целесообразен поиск более простых приближенных выражений.

Если предположить, что уровень границы  $\xi_0$  достаточно высок, так что среднее число его пересечений стационарным случайным процессом мало, а среднее значение интервала между пересечениями велико, то появления пересечений границы в первом приближении можно рассматривать как независимые. В этом случае распределение числа пересечений может быть приближенно описано законом Пуассона [1]:

$$P(k, T) = \frac{[\bar{N}(\xi_0)]^k}{k!} \exp[-\bar{N}(\xi_0, T)], \quad k=0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где  $\bar{N}(\xi_0)$  – среднее число пересечений.

Для практического использования выражения (3) достаточно знания лишь среднего числа пересечений уровня  $\xi_0$  с заданным знаком производной, нормального стационарного случайного процесса, среднее число пересечений которого определяется известной формулой Райса [1]:

$$\bar{N}(\xi_0) = \frac{\sqrt{-\rho''(0)}}{2\pi} \exp\left(-\frac{\xi_0^2}{2}\right), \quad (4)$$

где  $\rho''(0)$  – вторая производная от корреляционной функции при  $\tau=0$ ;  $\xi_0$  – нормированное на величину среднеквадратичной высоты волн значение границы.

Важной характеристикой является зависимость среднего числа выбросов от скорости ветра  $U$ . При использовании для оценки  $\bar{N}(\xi_0)$  выражения (4) среднее число выбросов уменьшается с возрастанием скорости ветра за счет уменьшения  $\rho''(0)$ , что противоречит экспериментальным результатам и является следствием использования в расчетах спектра Пирсона-Московица, не учитывающего обрушений морской волны при больших волновых числах.

Как показано в работе [3], при использовании фрактальной модели спектра морского

волнения среднее число выбросов связано кубической зависимостью со скоростью трения, а следовательно, и со скоростью ветра

$$\bar{N}(\xi_0) \propto g^{-1} k_m u_*^3, \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $k_m$  – волновое число верхней границы равновесного интервала в спектре морского волнения;  $u_*$  – скорость трения, связанная со средней скоростью ветра  $\bar{U}$  приближенной зависимостью  $u_* \approx 0.05\bar{U}$ .

Этот теоретический результат Филлипа подтверждается прямыми экспериментами [4], в которых среднее число выбросов аппроксимируется зависимостью

$$\bar{N}(\xi_0) = C_1 \tilde{u}_*^{\alpha_1}, \quad (6)$$

где  $\tilde{u}_* = \sqrt{\frac{k}{g}} u_*$  – нормированная скорость трения в пограничном слое;  $\lg C_1 = 1.1$ ;  $\alpha_1 = 2.9 \pm 0.6$  с коэффициентом корреляции 0.91.

Зависимости частоты появления выбросов от скорости трения, полученные в этой работе в естественных морских условиях, представлены на рис. 1. Видна существенная зависимость частоты появления обрушений от скорости трения, что соответствует модели Филлипа. Косвенным подтверждением кубической зависимости числа выбросов от скорости трения являются расчеты числа пенных гребней, проведенные Р. Е. Глазманом [5]. Зависимость среднего числа выбросов от дальности получена с использованием приведенного в [1] соотношения

$$\xi_0 \cong 0.6 \left[ \ln 0.275 - \ln \frac{\Psi}{\sigma_{\Delta\xi}} \right]^{3/4}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{\Delta\xi}$  – среднеквадратическое значение высоты неровностей;  $\Psi = h_r / r$ ;  $h_r$  – высота размещения РЛС;  $r$  – дальность. Результаты расчета представлены на рис. 2.

Распределение длительностей выбросов в общем случае определяется достаточно сложным выражением [1], что обусловило широкое применение приближенных методов его вычисления. В частности, в рамках метода временной дискретизации для стационарного нормального случайного процесса распределение длительностей выбросов имеет вид:

$$P_\tau(\tau = k\tau_0) = [1 - \Phi(\xi_0)]^{k-1} \Phi(\xi_0), \quad (8)$$

где  $\Phi(\xi)$  – интеграл вероятности;  $\tau_0$  – интервал дискретизации, который может быть определен по теореме Котельникова как  $\tau_0 \cong 1/\Delta F_{eff}$ ,  $\Delta F_{eff}$  – эффективная ширина спектра морского волнения.

Из (8) следует, что с увеличением порога  $\xi_0$  повышается вероятность появления коротких выбросов и уменьшается вероятность выбросов большой длительности, что иллюстрируется рис. 2.

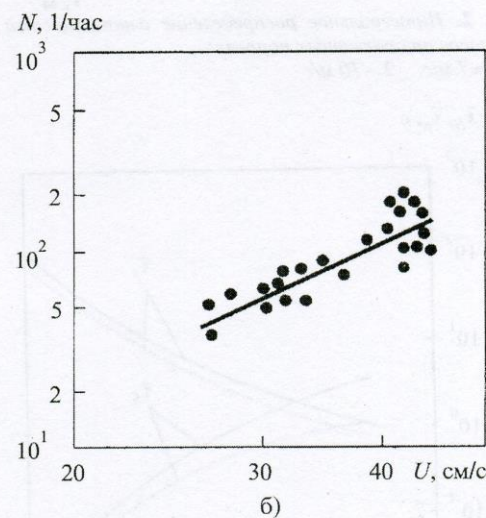
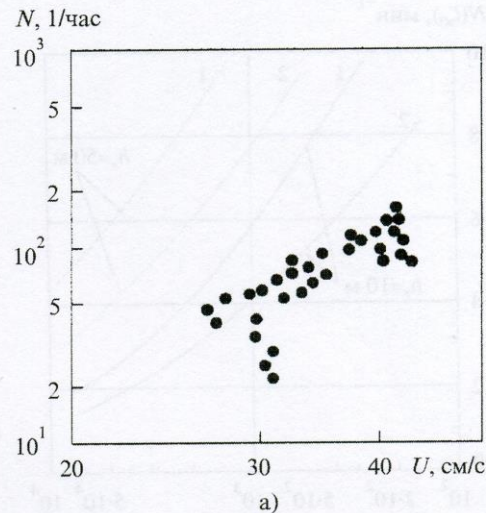


Рис. 1. Зависимость частоты появления выбросов от скорости трения для всех условий волнения (а) и волнения с унимодальным спектром (б)

При  $\xi_0=0$  это выражение заметно упрощается и приобретает вид:

$$P_{\tau}(\tau = k\tau_0) = \left(\frac{1}{2}\right)^k, \quad k=0, 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

Общие выражения для средних длительностей выбросов  $\bar{\tau}_S(\xi_0, t, T)$  над заданным уровнем и интервалов между ними  $\bar{\tau}_P(\xi_0, t, T)$  для нормального случайного процесса могут быть определены как

$$\bar{\tau}_S(\xi_0) = \frac{2\pi[1 - \Phi(\xi_0)]}{\sqrt{-\rho(0) \exp(-\xi_0^2/2)}}, \quad (10)$$

$$\bar{\tau}_P(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{-\rho(0) \exp(-\xi_0^2/2)}}. \quad (11)$$

Зависимости  $\bar{\tau}_S$ ,  $\bar{\tau}_P$  от величины порога представлены на рис. 3.

Таким образом, представленные в этом разделе результаты позволяют оценить основные характеристики выбросов морского волнения над некоторой границей в предположении, что морское волнение описывается дифференцируемым случайным процессом, т. е. отсутствует обрушение морских волн. С учетом обрушения результаты неизбежно должны претерпеть изменения.

### Характеристики всплесков радиолокационного сигнала

Рассмотрим соотношение входящих в (1) слагаемых, основываясь, прежде всего, на экспериментальных данных, полученных как в наших исследованиях, так и в ряде работ других авторов. Наиболее интересными представляются зависимости параметров всплесков от скорости ветра, величины порога и рабочей частоты РЛС.

Рассмотрим связь параметров всплесков со скоростью ветра. Из зависимостей суммарной ЭПР от скорости трения, полученных в  $K_u$ -диапазоне при двух поляризациях излучения и приема и угле скольжения  $45^\circ$  [6], видна практически линейная зависимость  $\sigma^0$  от скорости трения при  $u_* > 20$  см/с, соответствующей скорости ветра более 4 м/с на высоте 20 м. Вклад отражений от всплесков определялся путем усреднения во времени отдельных всплесков, зависимость  $\sigma_{sp}^0$  от скорости ветра при выбранном пороге аппроксимировалась выражением

$$\sigma_{sp}^0 = C_1 u_*^\alpha, \quad (12)$$

где показатель степени  $\alpha = 3.3$  при вертикальной и  $3.5$  – при горизонтальной поляризациях излучения и приема, коэффициент  $\lg C_1 = -3.3$  дБ. Зависимости  $\sigma_{sp}^0 = f(u_*)$  для двух поляризаций представлены на рис. 4. Видно, что при горизонтальной поляризации излучения вклад всплесков в суммарную ЭПР оказывается больше, чем при вертикальной. Если в рамках двухмасштабной модели отношение  $\sigma_v/\sigma_H$  обычно больше единицы, то в условиях обру-

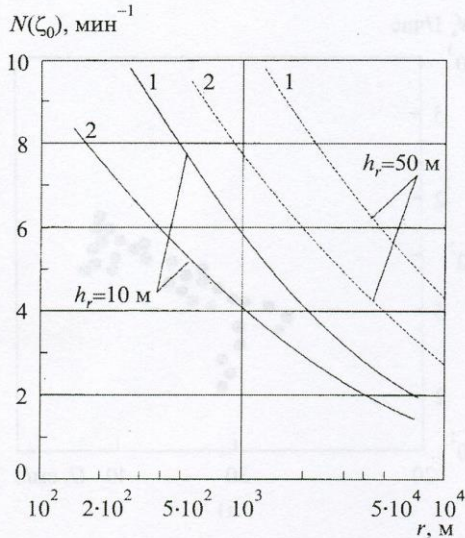


Рис. 2. Интегральное распределение длительностей выбросов при различных порогах: 1 –  $v=7$  м/с, 2 –  $10$  м/с

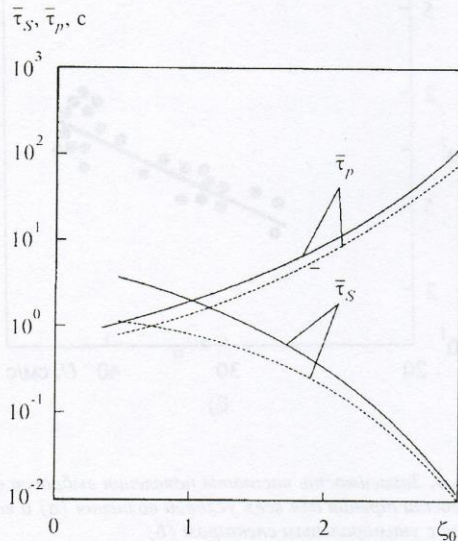


Рис. 3. Зависимость средней длительности выбросов и интервалов между ними от величины порога: —  $v=10$  м/с, - - -  $v=7$  м/с

шений оно достигает значений  $\sigma_v/\sigma_H \leq 1$ . Величина  $\sigma_{sp}^0/\sigma^0$  при уровне порога  $-7.2$  дБ и высоких скоростях ветра составляла приблизительно 5-10 % при вертикальной и 10-20 % – при горизонтальной поляризациях.

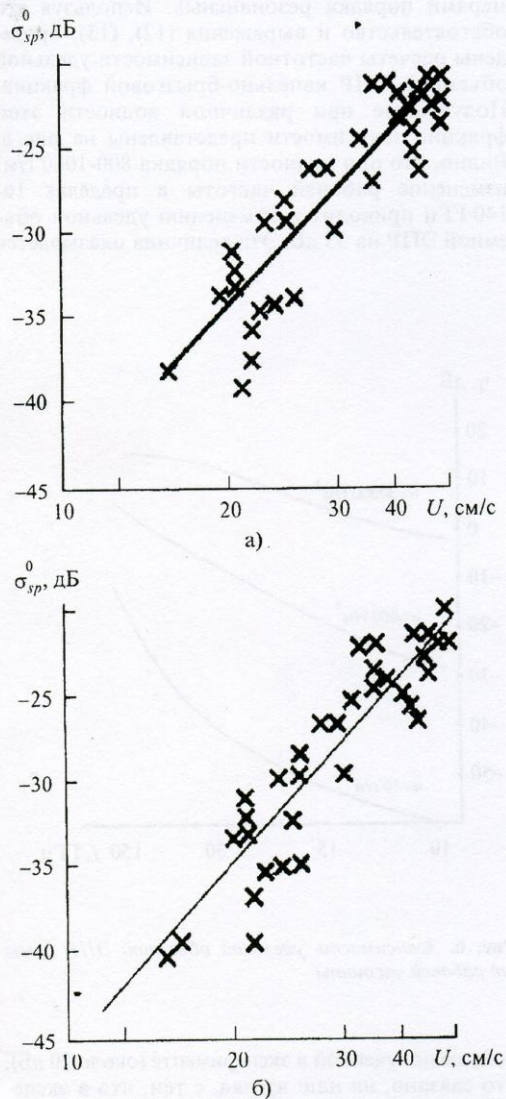


Рис. 4. Зависимость удельной ЭПР всплесков от скорости трения для двух поляризаций излучения: а) поляризация VV,  $\alpha = 3.3$ ; б) поляризация HH,  $\alpha = 3.5$

Заметный вклад отражений от всплесков в суммарную удельную ЭПР наглядно проиллюстрирован интегральными законами распределения  $\sigma^0$ , представленными на рис. 5 [7] (в

масштабе, линеаризирующем релейское распределение, нанесены распределения Вейбулла). В условиях обрушения (кривые 2 и 3) изменение параметров распределений указывает на

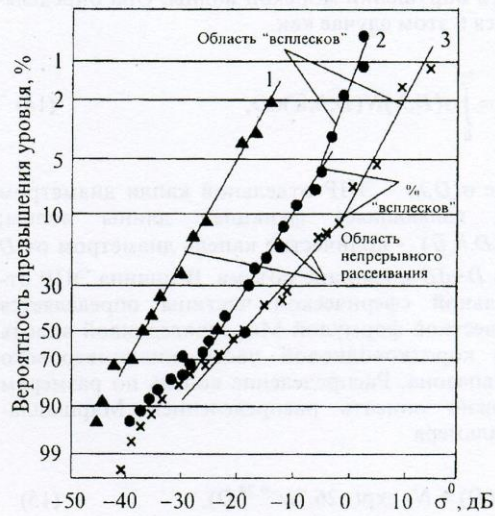


Рис. 5. Интегральный закон распределения удельной ЭПР

вклад отражений от всплесков при горизонтальной поляризации. Видно, что возрастание скорости ветра приводит к увеличению доли отражений от всплесков в суммарном сигнале, а величина вклада согласуется с результатами работы [6].

В модели удельной ЭПР моря, описанной в работах [8,9], второе слагаемое в (1) определяется отражениями от брызг, дающими большой вклад в суммарный сигнал в X- и особенно в миллиметровом диапазонах волн. В рамках этой модели рассматриваемое отношение равно

$$\frac{\sigma_{sp}^0}{\sigma^0} = [1 + 0.65 \cdot 10^{14} A_\psi A_V A_\phi \psi^{0.5} f^{-3.6} \exp(-1.4U)]^{-1}, \quad (13)$$

где  $f$  – рабочая частота, ГГц;  $\psi$  – угол скольжения в градусах;  $A_\psi$ ,  $A_V$ ,  $A_\phi$  – коэффициенты, соответственно определяющие зависимости удельной ЭПР от угла скольжения, скорости ветра и угла между направлениями облучения и ветра. Зависимость удельной ЭПР от скорости ветра оказывается более сильной, чем определенная в (12), кроме того, видна значительная зависимость от рабочей частоты РЛС. С уменьшением угла скольжения вследствие затенения морской поверхности вклад первого

слагаемого в (1) уменьшается, и рассеянный сигнал приобретает все более дискретный характер.

Оценим величину удельной объемной ЭПР капельно-брызговой фракции, образующейся при обрушении морской волны. Она определяется в этом случае как

$$\eta = \int_0^{\infty} \sigma(D, \lambda) N(D, h, \bar{u}) dD, \quad (14)$$

где  $\sigma(D, \lambda)$  – ЭПР отдельной капли диаметром  $D$ , являющаяся функцией длины волны;  $N(D, h, \bar{u})$  – количество капель диаметром от  $D$  до  $D+dD$  в единице объема. Величина ЭПР отдельной сферической частицы определяется известной формулой Ми, справедливой вплоть до коротковолновой части миллиметрового диапазона. Распределение капель по размерам можно описать распределением Маршалла-Пальмера

$$N(D) = N_0 \exp(-26.7w^{-0.24}D), \quad (15)$$

где  $w$  – водность в  $\text{г/м}^3$ . Следует отметить, что в облаке брызг, образующихся при обрушении морской волны средняя водность составляет 80-2000  $\text{г/м}^3$ .

В пользу гипотезы о решающем вкладе отражений от капель на формирование суммарного рассеянного сигнала говорит частотная зависимость удельной ЭПР морской поверхности.

Проведенные авторами работ исследования позволили получить распределения максимальных ЭПР всплесков при выборе порога на уровне, на 6 дБ превышающем средние значения ЭПР; эти распределения получены на волнах 3 и 0.8 см при использовании горизонтальной, вертикальной и круговой поляризации излучения, а на волне 2 мм – при вертикальной поляризации. Прежде всего, в равных погодных условиях максимальные ЭПР всплесков возрастают с укорочением длины волны и на волне 8 мм оказываются в среднем на 3-7 дБ, а на волне 2 мм – на 17-20 дБ выше, чем в трехсантиметровом диапазоне. С уменьшением угла скольжения происходит возрастание ЭПР всплесков, что может быть обусловлено появлением из зоны тени более интенсивных рассеивателей. Трудно определить связь максимальных ЭПР всплесков с поляризацией излучения. Если на волне 3 см вероятность того, что ЭПР всплесков больше  $0.1 \text{ м}^2$ , выше при горизонтальной поляризации, то на волне 8 мм вероятность появления всплесков с большими ЭПР оказывается выше при вертикальной поляризации. Отмечено заметное уменьшение

ЭПР всплесков (примерно на 10 дБ по сравнению с линейной) при круговой поляризации излучения.

Расчеты удельной ЭПР показали, что максимальный вклад в формирование рассеянного сигнала создается отражением от брызг с размерами порядка резонансных. Используя это обстоятельство и выражения (12), (13), проведены расчеты частотной зависимости удельной объемной ЭПР капельно-брызговой фракции. Полученные при различной водности этой фракции зависимости представлены на рис. 6. Видно, что при водности порядка 800-1000  $\text{г/м}^3$  изменение рабочей частоты в пределах 10-140 ГГц приводит к изменению удельной объемной ЭПР на 33 дБ. Эта величина оказывается

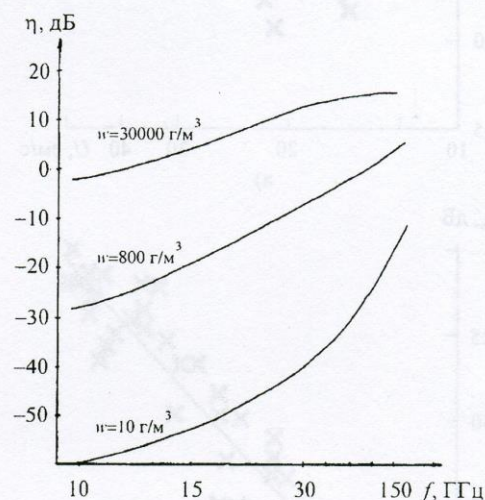


Рис. 6. Зависимость удельной объемной ЭПР брызг от рабочей частоты

больше полученной в эксперименте (около 20 дБ), что связано, на наш взгляд, с тем, что в эксперименте не представлялось возможным исключить вклад отражений непосредственно от морской поверхности (первое слагаемое в (1)). Это естественно привело к уменьшению динамического диапазона изменения удельной объемной ЭПР. В результате частотная зависимость удельной ЭПР может быть представлена в виде  $\eta \sim f^2$ .

Вероятность появления всплесков в ячейке разрешения за определенный промежуток времени по данным работ [10,11] может быть аппроксимирована распределением Пуассона:

$$P(n) = \frac{N^n}{n!} \exp(-N), \quad N > 0, \quad n > 0, \quad (16)$$

где  $N$  – средняя интенсивность появления всплесков.

Вероятность появления всплесков существенно зависит от угла скольжения, порога и состояния волнения. По данным той же работы [10] средняя интенсивность появления всплесков на волне 3 см составляла 10-12 мин<sup>-1</sup> при угле скольжения 0.4° и уменьшалась до 6-8 мин<sup>-1</sup> при угле скольжения 0.1±0.15°, что достаточно хорошо согласуется с данными о среднем числе пересечений случайным процессом заданного уровня, представленными на рис. 1 для скоростей ветра 7-10 м/с. Измерения авторов на частоте 140 ГГц при скоростях ветра менее 5 м/с и нулевом пороге, показали, что при углах скольжения менее 3.5° среднее количество всплесков составляло 20-24 мин<sup>-1</sup>.

Из зависимостей частоты появления всплесков радиолокационного сигнала от скорости трения, полученных на частоте 15 ГГц при двух поляризациях излучения и приема [6], видно, что на обеих поляризациях частота всплесков практически одинакова и может быть аппроксимирована зависимостью

$$N = C_1 \tilde{u}_*^{\alpha_1}, \quad (17)$$

где  $\lg C_1 = 1.1$ ,  $\alpha_1 = 2.9 \pm 0.6$ .

Это соотношение совпадает с моделью Филлипса [3], в которой зависимость  $N$  от скорости трения должна быть кубической. Наличие кубической зависимости удельной ЭПР всплесков (12) и числа всплесков  $N$  от скорости трения приводит к тому, что отношение этих величин не зависит от скорости ветра

$$\frac{\sigma_{sp}^0}{N} = const, \quad (18)$$

т. е. с возрастанием скорости ветра увеличивается и ЭПР отдельного всплеска. Данная зависимость определяет и распределения удельной ЭПР всплесков, которые, по измерениям [4], оказались практически не зависящими от скорости трения в диапазоне скоростей от 25 до 45 см/с.

С повышением порога вероятность появления всплесков уменьшается. По данным работы [12], полученным на волне 3 см при углах скольжения более 3° и направлении облучения навстречу волне, вероятность появления всплесков зависит как от выбора порога, так и от состояния морской поверхности. Результаты измерений для волнения моря 2 и 5 баллов представлены в табл. 1.

Из таблицы видно, что вероятность превышения порога при волнении 5 баллов при вертикальной поляризации заметно выше, чем при горизонтальной; она составляет величину до 0.3÷0.4 при  $V$  и до 0.1 – при  $H$ . При волнении 2 балла она составляет 0,01...0,1 при  $V$  и 0.01...0.03 для  $H$  (кроме значений для низкого уровня порога).

Вероятностные характеристики всплесков отраженного сигнала, полученные в работе [1] на волнах 3 и 0.8 см при углах скольжения менее 0.3° представлены в табл. 2 (выход синхронного детектора когерентной РЛС). В отличие от данных табл. 1, здесь не столь заметна поляризационная зависимость вероятности появления всплесков, однако значительная зависимость от выбора порога также прослеживается весьма отчетливо.

Таблица 1. Вероятность появления всплесков при горизонтальной ( $H$ ) и вертикальной ( $V$ ) поляризациях

| Пороговая ЭПР, м <sup>2</sup> | Волнение 2 балла |      | Волнение 5 баллов |      |
|-------------------------------|------------------|------|-------------------|------|
|                               | H                | V    | H                 | V    |
| 0.025                         | 0.07             | 0.57 | 0.36              | 0.60 |
| 0.100                         | 0.03             | 0.11 | 0.15              | 0.34 |
| 0.175                         | 0.01             | 0.03 | 0.11              | 0.41 |
| 0.250                         | 0.01             | 0.01 | 0.08              | 0.34 |

Таблица 2. Вероятностные характеристики всплесков на волнах 3 и 0.8 см

| Относительный порог | Поляризация излучения и приема | Вероятность всплесков на волне 3 см | Вероятность всплесков на волне 8 мм | Вероятность совпадения всплесков |
|---------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1.5                 | H                              | 0.27                                | 0.26                                | 0.06                             |
| 1.5                 | V                              | 0.22                                | 0.26                                | 0.05                             |
| 2.0                 | H                              | 0.09                                | 0.10                                | 0.02                             |
| 2.0                 | V                              | 0.09                                | 0.19                                | 0.01                             |

Эти зависимости вероятности появления всплесков от выбора порога также достаточно хорошо согласуются с выводами, полученными в разделе 1 при определении характеристик выбросов морской поверхности над заданной границей. Следует отметить слабое совпадение всплесков мгновенных значений рассеянного сигнала на двух волнах, что может быть обусловлено наличием несовпадающих на двух волнах механизмов формирования рассеянного сигнала.

Значительно выше вероятности появления всплесков и пауз между ними, полученные по скользящим средним амплитудам рассеянных сигналов на волнах 3 см (при использовании РЛС с непрерывным излучением) и 4 мм (с использованием импульсного излучения). Данные совместных вероятностей по каналам ортогонально поляризованных компонент рассеянного сигнала при использовании горизонтальной, вертикальной и наклонной поляризации излучения приведены в табл. 3; 0 и 1 означают паузу и всплеск соответственно, первое значение аргумента относится к вертикальной, а второе – к горизонтальной поляризациям приема. Из таблицы видно, что для скользящих средних амплитуд совпадение по каналам ортогонально поляризованных компонент всплесков и пауз наблюдается в 30-40 % времени, а несовпадение – в 10-20 %. В то же время всплески мгновенных значений амплитуды наблюдаются на обеих поляризациях примерно в 10 % времени, тогда как на согласованной поляризации в 45 %, а на ортогональной – в 15 % времени.

Анализ гистограмм распределения длительности всплесков, полученных на этих волнах (рис. 7, 8), показал, что наблюдается их хорошее качественное совпадение с распределением длительностей выбросов морской поверхности, представленных на рис. 3. Наиболее вероятные длительности всплесков составляют 0.4-0.6 с, а максимальные – достигают 4-5 с. При этом можно отметить увеличение длительностей всплесков и соответствующее уменьшение длительности пауз в коротковолновой части миллиметрового диапазона. Средние значения длительностей всплесков и пауз, полученные по десятиминутным реализациям рассеянного сигнала на волне 2 мм составили 1.2 с и 0.18 с соответственно. Это может объясняться двумя причинами.

Во-первых, уменьшение уровня порога на волне 2 мм по сравнению с использованным в более длинноволновых диапазонах могло привести к такому эффекту. Однако зависимости средней длительности всплесков  $\bar{\tau}_S$  и интервалов между ними  $\bar{\tau}_P$ , полученные на волне 3 см при горизонтальной и вертикальной поляризациях излучения и двух состояниях волнения моря (2 и 5 баллов) и представленные в табл. 4 [12], указывают, прежде всего, на достаточно слабую зависимость средней длительности всплесков от порога. Если средняя длина выбросов морской поверхности уменьшается примерно на порядок при увеличении порога в 2.5 раза (см. рис. 3), то средняя длительность всплесков изменяется примерно в два – пять раз при десятикратном изменении порога при вертикальной поляризации и почти не изменяется при горизонтальной.

Таблица 3. Вероятностные характеристики амплитуд всплесков на волнах 3 и 0.4 см

| Длина волны, см | Состояние моря               | Поляризация излуч. | Вероятности всплеска |       | Совместные вероятности |          |          |          |
|-----------------|------------------------------|--------------------|----------------------|-------|------------------------|----------|----------|----------|
|                 |                              |                    | $p_V$                | $p_H$ | $p(0,0)$               | $p(0,1)$ | $p(1,0)$ | $p(1,1)$ |
| 3.0             | U=15м/с<br>Волн.<br>5 баллов | V                  | 0.53                 | 0.50  | 0.34                   | 0.13     | 0.17     | 0.37     |
| 3.0             |                              | H                  | 0.51                 | 0.50  | 0.32                   | 0.17     | 0.19     | 0.32     |
| 3.0             |                              | накл.45°           | 0.51                 | 0.46  | 0.46                   | 0.40     | 0.10     | 0.14     |
| 0.4             |                              | V                  | 0.45                 | 0.15  | 0.49                   | 0.05     | 0.36     | 0.10     |
| 0.4             |                              | V                  | 0.42                 | 0.49  | 0.37                   | 0.21     | 0.14     | 0.28     |

Таблица 4. Средние длительности всплесков и интервалов между ними на волне 3 см

| Пороговая ЭПР, м² | Волнение 2 балла        |                         | Волнение 5 баллов       |                         |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                   | $\bar{\tau}_S$ (H/V), с | $\bar{\tau}_P$ (H/V), с | $\bar{\tau}_S$ (H/V), с | $\bar{\tau}_P$ (H/V), с |
| 0.025             | 0.15/0.50               | 1.85/0.35               | 0.48/1.93               | 0.82/0.78               |
| 0.100             | 0.15/0.17               | 4.37/1.25               | 0.33/1.15               | 0.73/1.09               |
| 0.175             | 0.13/0.12               | 6.48/3.21               | 0.32/0.87               | 2.23/1.01               |
| 0.250             | 0.13/0.10               | 10.04/9.06              | 0.30/0.59               | 2.41/0.94               |



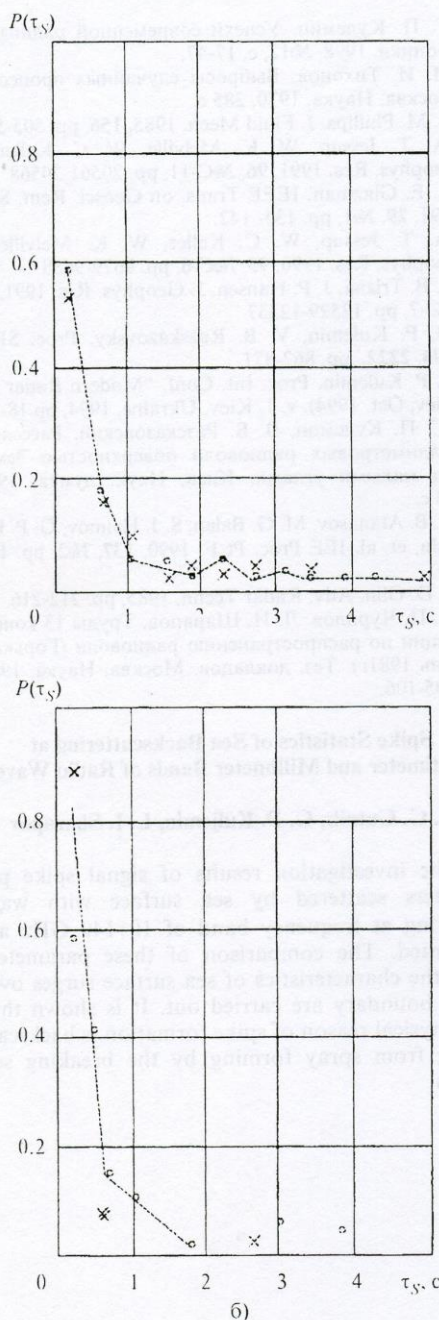


Рис. 7. Гистограммы распределения длительности всплесков на волнах 3 и 0.8 см, поляризация излучения и приема:

а) горизонтальная,  $r = 0.75$  км,  $U = 8$  м/с;

б) вертикальная,  $r = 1.2$  км,  $U = 6$  м/с;

о – 3 см, x – 8 мм

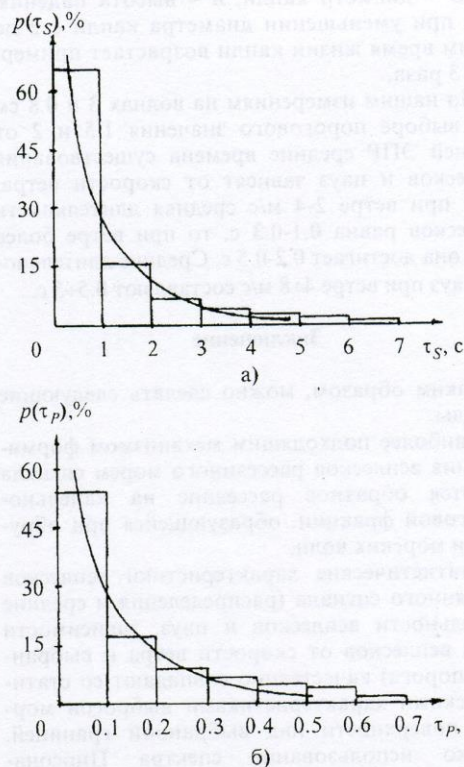


Рис. 8. Распределение длительностей всплесков и пауз на волне 2 мм

Достаточно заметно возрастание средней длительности пауз  $\bar{\tau}_p$  с увеличением порога, особенно при волнении моря 2 балла, когда полностью применимы результаты теории выбросов. Эти данные достаточно хорошо согласуются с результатами рис. 3. При волнении моря 5 баллов не происходит столь быстрого роста  $\bar{\tau}_p$  с увеличением порога.

Во-вторых, возрастание длительности всплесков на волне 2 мм может быть обусловлено мелкодисперсной фракцией брызг. Как следует из измерений радиолокационной отражаемости дождя [13], мелкокапельная часть в указанном диапазоне вносит существенно больший вклад в отраженный сигнал по сравнению с более длинноволновыми диапазонами. При обрушении морской волны время жизни капель до их падения в воду возрастает с увеличением диаметра и отсюда, как следствие, может наблюдаться увеличение длительности всплесков в радиолокационном сигнале. Время жизни определяется известным соотношением [1]

$$\tau_g \approx \frac{h}{10[1 - \exp(-5D)]}, \quad (19)$$

где  $D$  – диаметр капли,  $h$  – высота падения. Так, при уменьшении диаметра капли с 2 до 0.5 мм время жизни капли возрастает примерно в 3 раза.

По нашим измерениям на волнах 3 и 0.8 см при выборе порогового значения 1.5 и 2 от средней ЭПР средние времена существования всплесков и пауз зависят от скорости ветра. Если при ветре 2-4 м/с средняя длительность всплесков равна 0.1-0.3 с, то при ветре более 6 м/с она достигает 0.2-0.5 с. Средние длительности пауз при ветре 4÷8 м/с составляют 0.5÷5 с.

### Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

Наиболее подходящим механизмом формирования всплесков рассеянного морем сигнала является обратное рассеяние на капельно-брызговой фракции, образующейся при обрушении морских волн.

Статистические характеристики всплесков рассеянного сигнала (распределения и средние длительности всплесков и пауз, зависимости числа всплесков от скорости ветра и выбранного порога) качественно совпадают со статистическими характеристиками выбросов морской поверхности над выбранной границей. Однако использование спектра Пирсона-Московица морского волнения не позволяет удовлетворительно объяснить кубическую зависимость среднего числа всплесков от скорости ветра. Данная зависимость может быть объяснена существенным увеличением интенсивности спектральных компонент в равновесном интервале спектра при обрушении. В этом смысле предпочтительнее использовать модель Филлиписа.

### Литература

1. Г. П. Кулемин. Успехи современной радиоэлектроники. 1998, №12, с. 17-47.
2. И. И. Тихонов. Выбросы случайных процессов. Москва, Наука, 1970, 285 с.
3. O. M. Phillips. J. Fluid Mech. 1985, **156**, pp. 505-531.
4. A. T. Jessup, W. K. Melville, W. C. Keller. J. Geophys. Res. 1991, **96**, №C-11, pp. 20561-20568.
5. R. E. Glazman. IEEE Trans. on Geosci. Rem. Sens. 1991, **29**, №1, pp. 135-142.
6. A. T. Jessup, W. C. Keller, W. K. Melville. J. Geophys. Res. 1990, **95**, №C-6, pp. 9679-9688.
7. D. B. Trizna, J. P. Hansen. J. Geophys. Res. 1991, **96**, №C-7, pp. 12529-12537.
8. G. P. Kulemin, V. B. Razskazovsky. Proc. SPIE. 1994, **2222**, pp. 862-871.
9. G. P. Kulemin. Proc. Int. Conf. "Modern Radar'94" (Kiev, Oct. 1994). v. 1, Kiev, Ukraine, 1994, pp.18-27.
10. Г. П. Кулемин, В. Б. Разсказовский. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. Киев, Наук. думка, 1987, 230 с.
11. V. B. Atanasov, M. G. Balan, S. J. Haimov, G. P. Kulemin, et. al. IEE Proc. Pt F. 1990, **137**, №2, pp. 118-124.
12. J. D. Olin. Adv. Radar Techn. 1985, pp. 212-216.
13. В. П. Чурилов, Л. И. Шарапов. Труды 13 конференции по распространению радиоволн (Горький, июнь 1981г). Тез. докладов. Москва, Наука, 1981, с 105-106.

### Spike Statistics of Sea Backscattering at Centimeter and Millimeter Bands of Radio Waves

V. G. Gutnik, G. P. Kuljemin, L. I. Sharapov

The investigation results of signal spike parameters scattered by sea surface with wave breaking at frequency band of 10÷140 GHz are presented. The comparison of these parameters with the characteristics of sea surface surges over some boundary are carried out. It is shown that the physical reason of spike formation is backscattering from spray forming by the breaking sea waves.

