

УДК 621.391:621.396

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-125-131

Анализ статистических характеристик помех от морской поверхности

Е.А. Милащенко, А.А. Язовский

Известно, что для радиолокационных станций (РЛС) с длинными импульсами при облучении участка морской поверхности по дальности намного большей, чем длина морской волны помехи в виде отражений от морской поверхности имеют гауссовское распределение, а их огибающая — рэлеевское распределение. По мере уменьшения длительности импульсов (при увеличении разрешения радара по дальности и существенном влиянии малых углов скольжения) распределение помех становится негауссовским и закон распределения огибающей отличается от рэлеевского более длинным «хвостом». Помеха приобретает импульсный характер. Таким образом, приемник РЛС, спроектированный при стандартном предположении о гауссовском характере морских отражений, становится менее эффективным, поскольку повышается вероятность ложной тревоги по причине неверно выбранного значения порога правильного обнаружения, который не рассчитан на импульсный характер помехи. В связи с этим необходимо выбирать наиболее адекватную модель мешающих морских отражений.

Представлены обзор и анализ основных моделей негауссовских морских помех (логнормальная, Вейбулла и К-распределение), которые применяются для описания мешающих морских отражений. Большое внимание уделено модели, основанной на К-распределении. Проведено сравнение экспериментальных записей морских отражений, полученных при помощи когерентно-импульсной РЛС IPIX, с основными моделями морских помех. Результаты исследований показали, что логнормальная модель имеет тенденцию переоценивать динамический диапазон фактического распределения мешающих отражений, что означает более длинный «хвост» распределения, в то время как рэлеевская модель имеет тенденцию недооценивать динамический диапазон, то есть «хвост» — существенно короче. Модель помех, основанная на распределении Вейбулла, предоставляет гораздо более широкие возможности по статистическому моделированию морских помех, чем логнормальная или рэлеевская модели. В зависимости от параметров, распределение Вейбулла может переходить в рэлеевское или логнормальное распределения, таким образом, более точно отражая распределение реальных помех. Модель морских помех, основанная на К-распределении, по сравнению с другими рассмотренными моделями, наиболее точно описывает структуру огибающей морских отражений, даже в области «хвостов» распределения и является наиболее перспективной для описания огибающей морских отражений в РЛС с короткими зондирующими импульсами.

Ключевые слова: К-распределение, распределение Рэля, гауссовские и негауссовские помехи.

Для цитирования: Милащенко Е.А., Язовский А.А. Анализ статистических характеристик помех от морской поверхности // Вестник МЭИ. 2018. № 1. С. 125—131. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-125-131.

Analyzing the Statistical Characteristics of Clutter from the Sea Surface

Е.А. Milashchenko, А.А. Yazovsky

As is known, when radars with long impulses observe a sea surface area in a range much larger than the seawave length, the clutter in the form of reflections from the sea surface has the Gaussian distribution, and their envelope has the Rayleigh distribution. As the impulse width decreases (i.e., as the radar resolution range is increased along with significant influence of small grazing angles), the clutter distribution differs from the Gaussian one, and the envelope distribution law differs from the Rayleigh distribution in having a longer "tail". The clutter becomes impulsive in nature. Thus, the radar receiver designed proceeding from the standard assumption that the sea clutter obeys the Gaussian distribution becomes less effective, because the false alarm probability is increased due to an incorrectly chosen object detection threshold that is not designed for the impulse nature of clutter. Hence, a need arises to choose the most adequate model of disturbing sea clutter.

The article presents a review and analysis of the main models of non-Gaussian sea clutter (lognormal, Weibull and K-distribution) that are used to describe disturbing sea clutter. Much attention is paid to the model based on the K-distribution. The experimental records of sea clutter obtained using the IPIX coherent-pulse radar were compared with those obtained using the main sea clutter models. The study results have shown that the lognormal model tends to overestimate the dynamic range of the clutter actual distribution, which means that the distribution has a longer "tail". The Rayleigh model tends to underestimate the dynamic range; that is, the tail is significantly shorter. The clutter model based on the Weibull distribution offers much broader possibilities for statistically modeling sea clutter than those offered by the lognormal model or the Rayleigh model. Depending on the parameters, the Weibull distribution can transform into the Rayleigh or lognormal distribution, thus reflecting the distribution of real clutter in a more accurate manner. In comparison with the other considered models, the sea clutter model based on the K-distribution describes the sea clutter envelope structure most accurately, even in the zone of distribution "tails". Thus, the clutter model based on the K-distribution is the most promising one for describing the sea clutter envelope in a radar with short direct impulses.

Key words: K-distribution, Rayleigh distribution, Gaussian clutter, non-Gaussian clutter.

For citation: Milashchenko E.A., Yazovsky A.A. Analyzing the Statistical Characteristics of Clutter from the Sea Surface. MPEI Vestnik. 2018;1:125—131. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-125-131.

Введение

Эффективность работы радаров обзора морской поверхности существенно зависит от мешающих морских отражений. Существуют многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, основные достижения которых обобщены в [1 — 8], окончательное понимание характеристик пассивных морских помех (радиолокационных отражений от морской поверхности), существенно осложняющих процесс обнаружения, еще не достигнуто. Таким образом, необходимо продолжать работы в данном направлении с целью повышения качества работы РЛС, работающих на фоне морской поверхности. Разные авторы используют различные математические модели для описания статистических характеристик помех от морской поверхности и предлагают методы для оценки их параметров.

Представлены результаты сравнительного анализа моделей морских помех, которые широко применяются для описания статистики помех от морской поверхности, а также методы оценки их параметров. Проведено сравнение моделей помех с экспериментальными записями сигналов морских отражений, полученных РЛС ИРХ. Рассмотрена модель помехи, огибающая которой подчиняется K -распределению. В [1 — 4] показано, что подобная модель морских помех является наиболее подходящей, когда РЛС излучает короткие зондирующие импульсы, т. е. работает в режиме высокого разрешения по дальности и при существенном влиянии малых углов скольжения. За последние три десятилетия такая модель наиболее распространена в иностранной научно-технической литературе, посвященной исследованиям мешающих отражений от морской поверхности.

В отличие от модели помех, базирующейся на K -распределении, модели негауссовских морских помех не основываются на физических механизмах отражений от взволнованной морской поверхности. Их выбор и обоснование применимости определяет степень соответствия полученным экспериментальным данным.

Актуальность исследования также обусловлена тем, что большое количество современных судовых РЛС военного и гражданского назначения используют короткие зондирующие импульсы в тысячные и десятые доли микросекунд. Соответственно, для обеспечения возможности наиболее эффективного функционирования РЛС с таким режимом работы необходимо использовать наиболее адекватную негауссовскую модель мешающих морских помех, исследованию которой посвящена настоящая работа.

Анализ морских помех

Хорошо известно [1, 7, 8], что для морских РЛС, работающих в режиме излучения длинных зондирую-

щих импульсов, т. е. при облучении участка морской поверхности по дальности намного большего, чем длина морской волны, амплитуда отраженного от морской поверхности сигнала имеет гауссовское, а его огибающая — рэлеевское распределения. Поскольку отражения в таком случае представляют собой векторную сумму случайным образом фазированных компонентов от большого числа независимых элементарных отражателей, то в силу действия центральной предельной теоремы происходит нормализация статистики морских помех. Такие помехи могут иметь относительно короткий временной промежуток корреляции (около 10 мс) и могут быть полностью декоррелированы от импульса к импульсу с помощью перестройки частоты передатчика.

По мере уменьшения длительности зондирующего импульса и увеличения разрешения радара по дальности, также при заметном влиянии малых углов скольжения в распределении морских отражений наблюдается длинный «хвост», что означает появление большого количества значений сигнала с большой амплитудой (огибающей), и помеха приобретает импульсный характер [1 — 3, 7, 8]. В результате этого приемник РЛС, спроектированный при стандартном предположении о том, что помеха имеет гауссовское распределение, а ее огибающая — рэлеевское, становится менее эффективным, поскольку повышается вероятность ложной тревоги по причине неверно выбранного значения порога правильного обнаружения, не рассчитанного на скачки амплитуды (огибающей) помехи. Корреляционные характеристики помех также меняются. Импульсная помеха обычно имеет временной промежуток корреляции до нескольких секунд и остается такой при перестройке частоты передатчика от импульса к импульсу.

Частично подходящие статистические модели морских отражений, основанные на логнормальном распределении и распределении Вейбулла, нашли применение только благодаря экспериментальным исследованиям морских отражений и не основаны на физическом понимании механизмов их возникновения. Другим популярным распределением является составное K -распределение, имеющее преимущество по сравнению с другими моделями морских отражений. Оно заключается в том, что модель помех, основанная на K -распределении, имеет теоретическое обоснование и физическую интерпретацию. Дано описание данного распределения, оценивается его способность описывать статистические свойства реальных помех от морской поверхности, а также приведены методы оценки его параметров.

В ходе экспериментальных исследований в различных условиях было обнаружено, что излученные сигналы рассеиваются рябью на морской поверхности океана. Возникающие более крупные структуры на морской поверхности, которые можно назвать гравитационными волнами, а также «барашки», острые кром-

ки волн перед обрушением, брызги и пена после обрушения перекатывающихся волн приводят к изменению уровня мощности отражений [1 — 3]. Таким образом, огибающая помех для морских РЛС с короткими зондирующими импульсами и высоким разрешением может быть хорошо описана двумя компонентами.

Первый компонент основан на распределении Рэлея, временной промежуток корреляции которого составляет несколько миллисекунд. Когда частота зондирующего сигнала фиксирована, время корреляции этого компонента равно 5...10 мс.

Второй компонент меняет локальную среднюю мощность (дисперсию) первого компонента, т. е. мощность морских отражений меняется по причине влияния более крупных неоднородностей на морской поверхности. Локальная средняя мощность варьируется во времени и от ячейки разрешения к ячейке и описывается гамма-распределением. Его корреляционные свойства отличаются от компонента с рэлеевским распределением. Компонент с гамма-распределением не зависит от перестройки частоты от импульса к импульсу и меняется медленно с течением времени. В результате этого полностью некоррелированные отсчеты этого компонента не будут получены в течение времени облучения импульсами с малой длительностью.

Полностью статистически независимые отсчеты отраженного от морской поверхности сигнала могут быть получены следующим образом. Принимаемые от элемента разрешения отсчеты сигнала должны быть разделены на интервал времени больший, чем время корреляции гамма-компонента. Если отсчеты сигнала разделены по времени на время корреляции рэлеевского компонента, но недостаточны для декорреляции гамма-компонента, то компоненты с рэлеевским распределением будут некоррелированы, а составляющая с гамма-распределением — коррелирована.

Модель морских помех, основанная на распределении Рэлея

При излучении импульсов большой длительности, т. е. облучении участка морской поверхности по дальности большего, чем длина морской волны, в силу центральной предельной теоремы огибающая морских отражений имеет рэлеевскую плотность вероятности [4]:

$$P(E) = \frac{2E}{\sigma^2} \exp\left(-E^2 / \sigma^2\right), \quad (1)$$

где E — огибающая морских отражений; σ — среднеквадратическое отклонение огибающей морских отражений E .

Начальные моменты случайной величины E , имеющей рэлеевское распределение вероятности, определяются выражением [4]:

$$M\{E^r\} = \sigma^r \Gamma(1 + r/2), \quad (2)$$

где $M\{\cdot\}$ — символ математического ожидания; r — номер начального момента огибающей морских отражений E ; $\Gamma(\cdot)$ — гамма-функция.

Модель морских помех, основанная на логнормальном распределении

Распределение огибающей помехи от морской поверхности приближается к логнормальному, когда РЛС излучает короткие импульсы (имеет высокое разрешение по дальности) и луч падает на морскую поверхность под малым углом скольжения [2].

Логнормальная модель имеет тенденцию переоценивать динамический диапазон фактического распределения мешающих отражений, что означает слишком удлиненный «хвост» распределения, в то время как рэлеевская модель имеет тенденцию недооценивать динамический диапазон («хвост» — существенно короче).

С точки зрения обнаружения, можно сказать, что логарифмически нормальное распределение представляет собой наихудший случай возможной статистики помех по сравнению с рэлеевским распределением, которое соответствует наилучшей ситуации для радиолокационного наблюдения.

Плотность вероятности логнормального распределения описывается выражением [4]:

$$P_L(E) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)\sigma E}} \exp\left(-\frac{(\ln(E) - m)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где m — математическое ожидание случайной величины E .

Начальные моменты E , имеющей распределение (3), определяются как [4]:

$$M\{E^r\} = \exp\left(rm + \frac{1}{2}r^2\sigma^2\right). \quad (4)$$

Модель морских помех, основанная на распределении Вейбулла

Распределение Рэлея является частным случаем распределения Вейбулла, имеющего два параметра. Первый параметр (параметр формы) влияет на асимметричность распределения, в то время как второй является дисперсией и характеризует мощность отражений. Такое распределение математически удобно, поскольку позволяет менять асимметричность распределения с помощью одного из параметров, чтобы найти наилучшее соответствие экспериментальным данным.

Как известно, распределение Вейбулла может достаточно хорошо описывать помехи от морской поверхности для РЛС с короткими импульсами при малых углах скольжения. Выбор соответствующих значений параметра формы и дисперсии позволяет моделировать импульсный характер отражений.

Плотность вероятности распределения Вейбулла описывается следующим образом [4]:

$$P_W(E) = \frac{\gamma}{\sigma} \left(\frac{E}{\sigma} \right)^{\gamma-1} \exp \left(- \left(\frac{E}{\sigma} \right)^\gamma \right), \quad (5)$$

где γ — коэффициент асимметричности распределения.

Если имеется экспериментальная выборка из N отсчетов случайной величины E , коэффициент асимметричности γ аппроксимируется выражением [3]:

$$\gamma = \left\{ \frac{6}{\pi^2} \frac{N}{N-1} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ln(E_i))^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(E_i) \right)^2 \right] \right\}^{-\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Начальные моменты E , имеющей распределение Вейбулла, определяются [4]:

$$M\{E^r\} = \sigma^r \Gamma \left(1 + \frac{r}{\gamma} \right). \quad (7)$$

Модель помех, основанная на распределении Вейбулла [1 — 4], предоставляет определенные возможности для описания реального распределения помехи в гораздо более широком диапазоне условий, чем логнормальная или рэлеевская модели. В зависимости от параметров распределение Вейбулла может переходить в рэлеевское или логнормальное распределения. Можно сказать, что «вейбулловская» модель помех способна более точно отражать распределение реальных помех, чем распределение Рэля или логнормальное распределение.

Модель помех, основанная на K -распределении

Статистические результаты многих экспериментов [1, 2] свидетельствуют о том, что K -распределение может наиболее адекватно описывать распределение морской помехи. Модель K -распределения подтверждается базовой физической моделью, которая представляет принятый сигнал в виде суперпозиции отражений независимых отражателей [3, 4]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что статистика огибающей морских отражений может быть описана K -распределением, представляющим собой рэлеевское распределение, модулированное по мощности гамма распределением.

Выражение для K -распределения имеет следующий вид [1]:

$$P(E) = \frac{4b^{(v+1)/2} E^v}{\Gamma(v)} K_{v-1}(2E\sqrt{b}), \quad (8)$$

где b — параметр «шкалы», имеющий размерность обратной мощности; $K_v(\dots)$ — модифицированная функция Бесселя v -го порядка; v — определяется условиями наблюдения и параметрами локатора [3].

Моменты огибающей в случае K -распределения находятся как

$$M\{E^r\} = b^{\frac{-r}{2}} \left(\frac{\Gamma \left(1 + \frac{r}{2} \right) \Gamma \left(v + \frac{r}{2} \right)}{\Gamma(v)} \right). \quad (9)$$

Также известна плотность вероятности огибающей E аддитивной смеси помехи с K -распределением и гауссовского шума [1]:

$$p(E) = \frac{2Eb^v}{\Gamma(v)} \int_0^\infty \frac{x^{v-1} \exp(-bx)}{x + P_{\text{ш}}} \exp(-E^2/(x + P_{\text{ш}})) dx, \quad (10)$$

где $P_{\text{ш}}$ — мощность внутреннего гауссовского шума приемника.

Мощность $P_{\text{ш}}$ помехи с K -распределением огибающей определяется параметрами v и b [1]:

$$P_{\text{ш}} = 0,5 M\{E^2\} = 0,5(v/b), \quad (11)$$

тогда мощность смеси помехи с шумом связана с параметрами распределения (10) зависимостью

$$P_x = 0,5 M\{E^2\} = 0,5(v/b + P_{\text{ш}}) = 0,5P_{\text{ш}}(1 + \alpha), \quad (12)$$

где $\alpha = v/bP_{\text{ш}}$ — отношение мощностей «помеха/шум».

На рис. 1 представлен вид плотности вероятностей огибающей (10) для $v = 0,5$; $b = 0,5$ и различных отношений «помеха/шум»: $\alpha = 0, 10, 20, 30$ дБ; им соответствуют кривые 1 — 4; кривая 5 построена для $P_{\text{ш}} = 0$ (внутренний шум не учитывается).

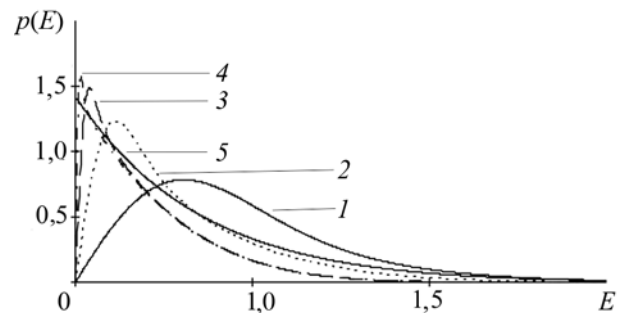


Рис. 1. Плотность вероятностей огибающей (10) для $v = 0,5$; $b = 0,5$ и различных отношениях «помеха/шум»

На рис. 1 продемонстрировано существенное отличие плотности вероятностей значений огибающей (10) от закона Рэля уже при $\alpha \geq 10$ дБ.

Сравнение помехи с K -распределением огибающей с другими моделями морских помех показывает следующие:

- когда параметр v стремится к бесконечности, K -распределение переходит в распределение Рэля;
- логнормальное распределение всегда имеет более затянутый «хвост» по сравнению с K -распределением;
- при $v = 0,5$ K -распределение сводится к распределению Вейбулла. В большом диапазоне значений параметра v они похожи, при этом K -распределение имеет более затянутый «хвост», чем распределение Вейбулла

при больших значениях ν и менее затянутый «хвост» при меньших значениях ν .

Расчет параметров K -распределения

Изначально, эмпирическая модель для определения параметров K -распределения была разработана в [9]. Она была предназначена для РЛС с длительностью импульса 30 нс (разрешение по дальности 4,2 м) и вертикально поляризованного зондирующего сигнала, а позже доработана для горизонтально поляризованного зондирующего сигнала. Такая модель определяет зависимость параметра ν от угла скольжения, разрешения по дальности, направления волн по отношению к лучу РЛС

$$\lg(\nu) = \frac{2}{3} \lg(\Phi) + \frac{5}{8} \lg(\rho) - K - \frac{\cos(2\theta)}{3}, \quad (13)$$

где $\Phi[\dots]$ — угол скольжения, °; ρ — разрешение РЛС по дальности, м; K — параметр, зависящий от вида поляризации (1,39 — при вертикальной и 2,09 — при горизонтальной); θ — угол между направлением луча РЛС и направлением морской ряби, рад.

Анализируя (13), можно сделать следующие выводы: значение параметра ν для горизонтальной поляризации излучаемого сигнала меньше, чем для вертикальной при одних и тех же условиях наблюдения и параметрах РЛС. Это означает, что для горизонтальной поляризации излучения импульсный характер помехи более выражен и корреляция от импульса к импульсу сильнее, чем для вертикальной поляризации, при одинаковых условиях. Малые углы скольжения уменьшают значение параметра ν и, соответственно, увеличивают импульсный характер отражений. Параметр ν напрямую не зависит от состояния моря, скорости ветра или его направления по отношению к лучу РЛС (от этих условий зависит параметр b). Параметр ν принимает малые значения, когда ветер направлен вдоль или против направления движения волн, большие значения параметра ν характерны для случаев направления ветра поперек направления движения волн или других углах. Параметры модели (13) не связаны между собой и влияют на значение ν отдельно.

Позднее в [10] эта модель была модифицирована и дополнена прямой зависимостью от длительности зондирующего импульса:

$$\lg(\nu) = \frac{2}{3} \lg(\Phi) + \frac{5}{8} \lg(\rho) - K - \frac{\cos(2 \cdot \theta)}{3} + \lg\left(\frac{\tau_{\text{и}}}{30}\right) \lg\left(\frac{50}{\Phi}\right) \lg(5,5\Phi)^{0,8}, \quad (14)$$

где $\tau_{\text{и}}$ — длительность зондирующего импульса, нс.

Выражение (14) позволяет определить параметр ν для длительности зондирующего импульса в 30 нс и более. Следует отметить, что нет выражения для определения параметра ν при разрешении РЛС по дальности 4 м и менее [4].

При составлении математических моделей для статистического моделирования часто возникает необходимость определить параметр b по параметру ν .

Принимаемую мощность помехи можно также определить как

$$P_{\text{п}} = \frac{P_i \mu_c G^2 \lambda^2 \sigma^0 S_{\text{об}}}{(4\pi)^3 R^4 L_a L_{\mu}}, \quad (15)$$

где σ^0 — удельная ЭПР облучаемой поверхности; μ_c — коэффициент сжатия импульсов; L_{μ} — сумма потерь в антенне и трактах приемника; P_i — излучаемая мощность, Вт; L_a — потери в атмосфере с учетом погодных условий; R — наклонная дальность, м; G — коэффициент усиления антенны; $S_{\text{об}}$ — облучаемая площадь, м²; λ — длина волны зондирующего сигнала, м.

Подставив (15) в (11) или (12), найдем параметр b . Для определения удельной ЭПР облучаемого участка используем модель, разработанную в 1970-х гг. учеными из Georgia Institute of Technology (Технологический институт Джорджии, США) [4]. Она подходит для радаров с частотой несущей от 1 до 100 ГГц. Приведем выражения для частотного диапазона от 1 до 10 ГГц.

Удельная ЭПР взволнованной морской поверхности определяется следующим образом [4]:

для горизонтальной поляризации

$$\sigma_{\text{HH}}^0 = 10 \lg(3,9 \cdot 10^{-6} \lambda \varphi^{0,4} A_i A_u A_w); \quad (16)$$

для вертикальной поляризации и несущей частоты передатчика меньше 3 ГГц

$$\sigma_{\text{VV}}^0 = \sigma_{\text{HH}}^0 - 1,73 \ln(h + 0,015) + 3,76 \ln(\lambda) + 2,46 \ln(\varphi + 0,0001) + 22,2; \quad (17)$$

для вертикальной поляризации и несущей частоты передатчика от 3 до 10 ГГц

$$\sigma_{\text{VV}}^0 = \sigma_{\text{HH}}^0 - 1,05 \ln(h + 0,015) + 1,09 \ln(\lambda) + 1,27 \ln(\varphi + 0,0001) + 9,7, \quad (18)$$

где параметры A_i, A_u, A_w определяются условиями радиолокационного наблюдения. Для них приняты следующие эмпирические формулы.

Параметр A_i учитывает многолучевость и интерференцию

$$A_i = \frac{\sigma_{\varphi}^4}{1 + \sigma_{\varphi}^4}. \quad (19)$$

Шероховатость морской поверхности σ_{φ}^4 определяется как

$$\sigma_{\varphi}^4 = (14,4\lambda + 5,5) \frac{\varphi h}{\lambda}, \quad (20)$$

где φ — угол скольжения, рад.

Параметр A_u — направление ветра

$$A_u = \exp\left(0,2 \cos(\theta_w)(1 - 2,8\varphi)(\lambda + 0,02)^{-0,4}\right), \quad (21)$$

где θ_w — угол между направлением ветра и лучом РЛС, рад.

Параметр A_w — состояние взволнованной морской поверхности

$$A_w = \left(\frac{1,94U}{1 + (U/15,4)}\right)^{1,1/(\lambda + 0,015)^{0,4}}. \quad (22)$$

Выразим скорость ветра U через среднюю высоту волны h

$$U = 8,67h^{0,4}. \quad (23)$$

Сравнение экспериментальных записей морских отражений с основными моделями морских помех

С целью определения наиболее адекватной модели морских помех, проведем сравнение записей морских отражений [11], полученных в ходе экспериментов с когерентно-импульсной РЛС ИРХ, которые проводились профессором Саймоном Хайкином в университете Макмастера в 1993 г. в г. Дартмут (Канада), с основными моделями морских помех.

Условия эксперимента № 269 (взволнованная морская поверхность) и параметры РЛС: высота волн — 1,8 м (максимально 2,9 м); высота установки антенны над уровнем морской поверхности — 30 м; дальность до участка облучаемой поверхности моря — 930 м; угол между направлением луча РЛС и направлением морской ряби — 190°; частота передатчика — 9,39 ГГц; коэффициент шума — 1,2 дБ; длительность импульса — 200 нс; разрешение по дальности — 30 м; частота повторения импульсов — 1 кГц; ширина диаграммы направленности — 0,9°; поляризация на излучение и прием — вертикальная; антенна неподвижна; когерентное накопление отсчетов принятого сигнала в каждом импульсе.

На рис. 2 представлена гистограмма огибающей морских отражений (кривая 1) в эксперименте № 269 и кривые плотности распределения вероятности огибающей морских помех, основанные на K -распределении (кривая 2), логнормальном (кривая 3), рэлеевском (кривая 4) и распределении Вейбулла (кривая 5). Использовано 131 072 принятых импульса, что эквивалентно 131 с радиолокационного наблюдения. Параметры моделей соответствуют условиям эксперимента и характеристикам РЛС.

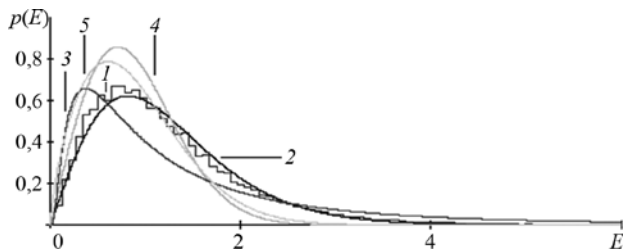


Рис. 2. Гистограмма огибающей морских отражений (1) в эксперименте № 269 и кривые плотности распределения вероятности огибающей морских помех, основанные на K -распределении (2), логнормальном (3), рэлеевском (4) и распределении Вейбулла (5)

Расчетные параметры моделей для рис. 2: мощность помехи $P_n = 1$ Вт, угол скольжения $\Phi = 1,8^\circ$, параметры K -распределения $\nu = 3,841$, $b = 1,92$.

По данным рис. 2 можно сделать вывод, что модель морской помехи, основанная на K -распределении, дает адекватную статистику огибающей при спокойном состоянии моря.

Условия эксперимента № 287 (спокойное состояние моря) и параметры РЛС: высота волн — 0,8 м (максимально 1,3 м); высота установки антенны над уровнем морской поверхности — 30 м; дальность до участка облучаемой поверхности моря — 1320 м; угол между направлениями луча РЛС и морской ряби — 55°; частота передатчика — 9,39 ГГц; коэффициент шума — 1,2 дБ; длительность импульса — 200 нс; разрешение по дальности — 30 м; частота повторения импульсов — 2 кГц; ширина диаграммы направленности — 0,9°; поляризация на излучение и прием — вертикальная; антенна неподвижна; когерентное накопление отсчетов принятого сигнала в каждом импульсе.

На рис. 3 изображены гистограмма экспериментальных значений огибающей морских отражений (кривая 1) в эксперименте № 287 и кривые плотности распределения вероятности огибающей морских помех, основанные на K -распределении (кривая 2), логнормальном (кривая 3), рэлеевском (кривая 4) и распределении Вейбулла (кривая 5). Использовано 131 072 принятых импульса, что эквивалентно 65,5 с радиолокационного наблюдения. Параметры моделей соответствуют условиям эксперимента и характеристикам РЛС.

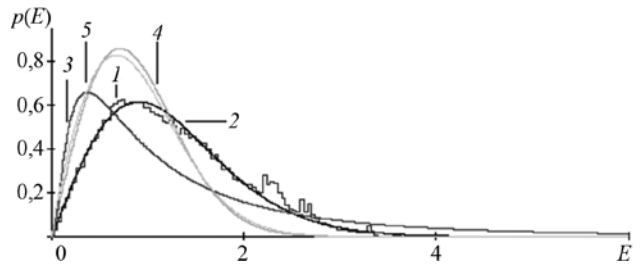


Рис. 3. Гистограмма экспериментальных значений огибающей морских отражений (1) в эксперименте № 287 и кривые плотности распределения вероятности огибающей морских помех, основанные на K -распределении (2), логнормальном (3), рэлеевском (4) и распределении Вейбулла (5)

Расчетные параметры моделей для рис. 3: мощность помехи $P_n = 1$ Вт, угол скольжения $\Phi = 1,3^\circ$, параметры K -распределения $\nu = 7,502$, $b = 3,751$.

Исходя из данных рис. 3 можно сделать вывод, что модель морской помехи, основанная на K -распределении, дает адекватную статистику огибающей при спокойном состоянии моря.

Закключение

Рассмотрены четыре типа статистических распределений (K -распределение, логнормальное, Вейбулла, Рэля), использующиеся для моделирования мешающих отражений от морской поверхности. Наиболее подробно проанализирована модель помехи, огибающая которой имеет K -распределение. Для оценки возможностей адекватного описания статистики морских помех такими моделями были использованы записи сигнала, отраженного от морской поверхности, полученные с помощью РЛС морского наблюдения с высоким разрешением. Построе-

на гистограмма распределения записей принятого сигнала, сравниваемая с плотностью распределения вероятности рассматриваемых моделей помех, параметры которых соответствуют условиям наблюдения и характеристикам РЛС. Показано, что модели помех, основанные на распределениях Вейбулла, логнормального и Рэлея, не дают точного описания статистики помех, поскольку не полностью описывают динамический диапазон уровня помех. Модели помех, базирующиеся на распределениях Рэлея и Вейбулла, обычно недооценивают динамический диапазон уровня принимаемых помех, в то время как модель помехи, опирающаяся на логнормальное распределение, всегда переоценивает динамический диапазон мешающих отражений. В особенности это касается затянутости «хвостов» распределений, которая обусловлена импульсным характером отражений от морской поверхности. Поскольку они существенно влияют на уровень выбираемого порога и, соответственно, на вероятность ложной тревоги, то возможность точного описания статистики позволяет выбрать оптимальный способ обработки принимаемого сигнала и порог обнаружения. Доказано, что модель морских помех, основанная на K -распределении, по сравнению с другими рассмотренными моделями наиболее точно описывает структуру морских отражений, даже в области «хвостов» распределения. Таким образом, она наиболее перспективна для описания морских отражений в РЛС с короткими зондирующими импульсами.

Литература

1. **Ward K.** Sea Clutter: Scattering, the K -distribution and Radar Performance. Croydon: CPI Group Ltd, 2013.
2. **Watts S.** The Modeling of Radar Sea Clutter. A Thesis Submitted to the University of Birgingham for the Degree of Doctor of Science. Birmingham: University of Birmingham, 2013.
3. **Antipov I.** Analysis of Sea Clutter Returns. Salisbury: DSTO Electronic and Surveillance Research Laboratory, 1998.
4. **Antipov I.** Simulation of Sea Clutter Returns. Salisbury: DSTO Electronic and Surveillance Research laboratory, 1998.
5. **Bocquet S.** Calculation of Radar Probability of Detection in K -Distributed Sea Clutter and Noise. Canberra: DSTO Defence Science and Technology Organisation, 2011.
6. **Cetin A.** CFAR Detection in K -distributed Sea Clutter. Ankara: Middle East Technical University, 2008.
7. **Винокуров В.И.** Морская радиолокация. Л.: Судостроение, 1986.
8. **Кравченко В.Ф.** Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне. М.: Физматлит, 2015.
9. **Ward K, Baker C, Watts S.** Maritime Surveillance Radar. Pt. 1: Radar Scattering from the Ocean Surface // IEEE Proc. 1990. V. F. No. 2. Pp. 51—62.
10. **Ryan J., Johnson M.** Radar Performance Prediction for Target Detection at Sea // IEEE Proc. 1992. No. 365. Pp. 13—17.
11. **Cognitive Systems Laboratory** [Официальный сайт] <http://soma.mcmaster.ca/ipix/dartmouth/datasets.html> (дата обращения 25.03.2017)

References

1. **Ward K.** Sea Clutter: Scattering, the K -distribution and Radar Performance. Croydon: CPI Group Ltd, 2013.
2. **Watts S.** The Modeling of Radar Sea Clutter. A Thesis Submitted to the University of Birgingham for the Degree of Doctor of Science. Birmingham: University of Birmingham, 2013.
3. **Antipov I.** Analysis of Sea Clutter Returns. Salisbury: DSTO Electronic and Surveillance Research Laboratory, 1998.
4. **Antipov I.** Simulation of Sea Clutter Returns. Salisbury: DSTO Electronic and Surveillance Research laboratory, 1998.
5. **Bocquet S.** Calculation of Radar Probability of Detection in K -Distributed Sea Clutter and Noise. Canberra: DSTO Defence Science and Technology Organisation, 2011.
6. **Cetin A.** CFAR Detection in K -distributed Sea Clutter. Ankara: Middle East Technical University, 2008.
7. **Vinokurov V.I.** Morskaya Radiolokatsiya. L.: Sudostroenie, 1986. (in Russian).
8. **Kravchenko V.F.** Rasseyanie Radiovoln Morem i Obnaruzhenie Ob'ektov na ego Fone. M.: Fizmatlit, 2015. (in Russian).
9. **Ward K, Baker C, Watts S.** Maritime Surveillance Radar. Pt. 1: Radar Scattering from the Ocean Surface. IEEE Proc. 1990;F;2:51—62.
10. **Ryan J., Johnson M.** Radar Performance Prediction for Target Detection at Sea. IEEE Proc. 1992;365:13—17.
11. **Cognitive Systems Laboratory** [Ofits. Sayt] <http://soma.mcmaster.ca/ipix/dartmouth/datasets.html> (Data Obra-shcheniya 25.03.2017)

Сведения об авторах

Милащенко Егор Александрович — аспирант кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, инженер-конструктор АО «ОКБ «Новатор» (АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей»), e-mail: mea_mail@mail.ru

Язовский Александр Афонасьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, e-mail: jazovsky@mail.ru

Information about authors

Milashchenko Egor A. — Ph.D.-student of Electronic and Telecommunication Systems Dept., Ural Federal University Named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Engineer-constructor of JSC «OKB «Novator» (JSC «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation), e-mail: mea_mail@mail.ru

Yazovsky Aleksandr A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electronic and Telecommunication Systems Dept., Ural Federal University Named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, e-mail: jazovsky@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.04.2017