

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ РАССЕИВАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН НАД ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ МОРЯ

С. Я. Брауде

В работе предлагается методика статистического изучения распределения рассеивателей путем измерения радиосигналов, отраженных от взволнованной поверхности моря. Для этой цели используются методы, аналогичные тем, которые применяются в радиоастрономии при определении распределения дискретных источников космического радиоизлучения. Сравнения с экспериментом показали, что предлагаемая методика позволяет получить некоторые данные о характере распределения элементов, рассеивающих радиоволны.

В последние годы появилось большое число работ [1-7], посвященных рассеянию электромагнитной энергии на морских волнах, в которых указанное явление изучалось в диапазоне частот от 18 до 50000 мц. Одной из причин, побуждающей детально исследовать возникающие при этом процессы, является то, что рассеяние радиоволн взволнованной поверхностью моря заметным образом ухудшает эксплуатационные характеристики морских радиолокационных станций.

До настоящего времени отсутствует теория рассеяния, и поэтому для количественных расчетов используется феноменологическая модель, позволяющая определять среднюю мощность рассеянных сигналов \bar{P}_n при облучении морской поверхности радиолокационной станцией.

Как известно [1], \bar{P}_n определяется при небольших углах места Θ из соотношения

$$\bar{P}_n = \frac{PrG^2\lambda^2}{(4\pi R)^3} f^4(\Theta) \varphi \frac{c\tau}{2} \sigma^{(0)}(\Theta), \quad (1a)$$

а при больших углах Θ из соотношения

$$\bar{P}_n = \frac{PrG^2\lambda^2}{(4\pi)^3 R^2} \frac{\varphi\psi}{\sin \theta} \sigma^{(0)}(\Theta). \quad (1б)$$

Здесь P_r —мощность передатчика, G —коэффициент направленного действия антенны, R —дистанция, λ —длина волны, $f(\Theta)$ —диаграмма направленности антенны, φ, ψ —ширина диаграмм в азимутальной и вертикальной плоскостях, τ —продолжительность импульса, $\sigma^{(0)}(\Theta)$ —поперечное сечение рассеяния поверхности моря на единицу площади.

При выводе этих формул, кроме учета чисто геометрических факторов, было сделано предположение о том, что рассеиватели независимы, некогерентны и равномерно распределены на поверхности моря [1].

До настоящего времени правомерность предположения о равномерном распределении рассеивателей не подтверждена эксперимен-

тально с достаточной убедительностью. В настоящей заметке предлагается методика, которая позволяет провести такую проверку, и приводятся некоторые экспериментальные данные.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАССЕИВАТЕЛЕЙ

Экспериментальная проверка равномерности распределения рассеивателей на поверхности моря проводилась [1] либо путем изучения зависимости рассеянной мощности \bar{P}_n от различных параметров (τ , φ , ψ) и сравнения опытных данных с формулами (1), либо путем измерения распределения рассеивателей с помощью радиолокационных станций, имевших большую разрешающую способность, т. е. работавших с узкой диаграммой направленности, на очень коротких импульсах. Как показали опыты [1], при больших углах места имеется неплохое качественное совпадение зависимости \bar{P}_n от углов φ и ψ и количественное совпадение зависимости \bar{P}_n от τ . Однако в ряде случаев (обычно при малых углах места $\Theta < 1^\circ$) оказалось [1], что рассеиватели распределены на море неравномерно.

Следует напомнить, что при скользящем распространении радиоволн ($\Theta < 1^\circ$) часто вместо обычной (для больших углов места) картины на отметчике типа А (когда рассеянные сигналы видны в виде „травки“) на экране трубки наблюдаются отдельные импульсы на различных дистанциях (см. рис. 4 и 5 работы [6]). Такая „импульсная структура“ имеет место и в тех случаях, когда импульс облучающей радиолокационной станции достаточно широкий и нельзя разрешить сигналы, рассеянные отдельными морскими волнами [6].

Описанная выше методика проведения опытов не только сложна и громоздка, но в ряде случаев, особенно при наличии „импульсной структуры“, с ее помощью не удастся однозначно определить, является ли данное распределение рассеивателей однородным или нет.

Поэтому для указанной цели предлагается использовать статистические методы, аналогичные тем, которые применяются в строфизике и радиоастрономии [8, 9] для определения распределения дискретных источников космического радиозлучения.

Пусть рассеивающие элементы распределены на поверхности моря равномерно и все они излучают изотропно одинаковую мощность. Обозначим через \bar{P}_{0n} и \bar{P}_n минимальную и данную средние мощности, которые принимаются радиолокационной станцией с максимальной и заданной дистанций R_0 и R . Очевидно, что общее число источников N_0 и N , которые будут рассеивать мощности \bar{P}_{0n} и \bar{P}_n и большие, будет пропорционально R_0^2 и R^2 соответственно. Таким образом,

$$\frac{N}{N_0} \sim \left(\frac{R}{R_0}\right)^2, \quad (2)$$

с другой стороны, согласно (1),

$$\frac{\bar{P}_n}{\bar{P}_{0n}} \sim \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-\alpha}, \quad (3)$$

где показатель α определяется величиной угла места Θ . Так, для больших углов места $\alpha = 2$, для малых $-\alpha = 3$, а при $\Theta \rightarrow 0$ $\alpha = 7$ [1, 2, 5]. Исключая R/R_0 из (2) и (3) и логарифмируя, получаем

$$10 \lg N \sim -\frac{2}{\alpha} \bar{P}_n.$$

Здесь N выражено в процентах, а \bar{P}_n — в *дб*. (4)

Если построить график, где по оси абсцисс отложить величину среднего рассеянного сигнала \bar{P}_n (в дБ), а по оси ординат — удесятеренный логарифм от числа рассеивателей (в процентах) с мощностью, равной или большей \bar{P}_n , то, как видно из (4), на рисунке получится прямая с наклоном K , где

$$K = -2/\alpha. \tag{5}$$

В соответствии с различными значениями α возможные значения K приведены в таблице 1. Так как у каждой радиолокационной станции имеется предельная дальность, следует ожидать, что при $N \rightarrow 100\%$ ($10 \lg N \rightarrow 20$) экспериментальные точки должны отклониться от прямой, описываемой уравнением (4).

Таблица 1

α	2	3	7
K	-1	-0,67	-0,29

Приведенная методика была применена для обработки опытов, описанных в работе [5]. Использовалась экспериментальная зависимость \bar{P}_n от дистанции, полученная для волны 3,2 см. Измерения проводились при углах места $-7^\circ \geq \Theta \geq 1,5^\circ$ („ближняя“ зона), где оказалось, что $\bar{P}_n \sim \frac{1}{R^3} (K_0 \approx -0,67)$, и при углах места $-1,2^\circ \geq \Theta \geq 0,7^\circ$ („дальняя“ зона), где $\bar{P}_n \sim \frac{1}{R^7} (K_0 \approx -0,29)$.

Для этих опытов на рис. 1 дана зависимость $10 \lg N$ от \bar{P}_n дБ. Как видно из рисунка, точки хорошо группируются вблизи двух прямых I и II с наклонами $K_1 = -0,38$ для „ближней“ и $K_2 = -0,17$ для „дальней“ зон. Как следует из этих данных, для обеих зон (т. е. тогда, когда $\bar{P}_n \sim 1/R^3$ и $\bar{P}_n \sim 1/R^7$) наклоны прямых K_1 и K_2 отлича-

ются от соответствующих значений K_{01} и K_{02} в том случае, если бы рассеиватели были распределены равномерно.

Интересно заметить, что для обеих зон отношение $\frac{K_1}{K_{01}}$ и $\frac{K_2}{K_{02}}$ одинаково и равно $0,57 \pm 0,59$.

В исследованиях, посвященных распределению источников космического излучения [8,9], указывается, что уменьшение наклона прямой K может быть связано с тем, что источники имеют форму дисков. В этом случае отношение наклонов прямых для дисков и для равномерного распределения может изменяться от 0,5 до 0,67. Для рассмотренного нами случая указанное соображение в известной мере совпадает с теорией, развитой в работах [2,5], в которых предполагается, что рассеяние радиоволн сантиметрового диапазона происходит от дисков-фасеток, хаотически распределенных на поверхности морских волн.

Весьма часто при изучении рассеяния радиоволн удобно использовать не зависимость \bar{P}_n от дистанции, а изменение \bar{P}_n во

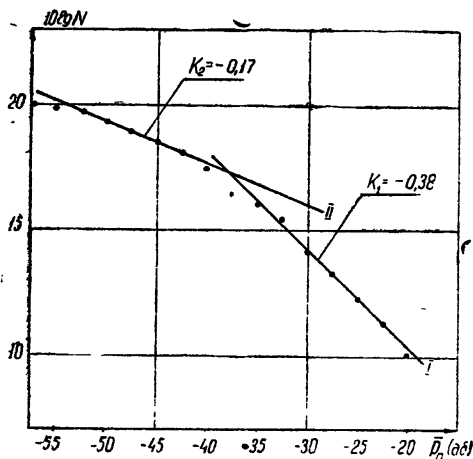


Рис. 1.

времени, причем в этом случае \bar{P}_n — вся средняя мощность, принятая приемником. Возникает вопрос, нельзя ли использовать временную запись \bar{P}_n для изучения распределения рассеивателей. Для того, чтобы применить и в этом случае описанную выше методику, необходимо показать, что усреднение мощности по ансамблю рассеивателей эквивалентно усреднению по времени, а также доказать, что интегральная вероятность того, что данные рассеиватели имеют мощность \bar{P}_n , большую заданной, и в этом случае связана с \bar{P}_n соотношением (4).

Первое из необходимых требований, по-видимому, выполняется в силу эргодической гипотезы, однако второе положение не является очевидным. Тем не менее, не доказав это положение, мы попытались описанным выше способом обработать временный ход \bar{P}_n . Для этой цели были использованы данные, приведенные в работе [6]. На рис. 2 дана зависимость $10 \lg N$ от $\bar{P}_{об}$ для одновременно проведенных опытов на частотах 24000 мГц и 35000 мГц при угле места $\theta = 80^\circ$. При обработке использовалась десятисекундная запись напряженности поля на ленте длиной 80 мм (рис. 8 работы [6]), причем данные снимались через каждый мм. Как видно из

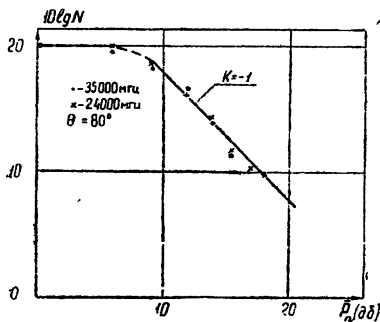


Рис. 2.

рисунка, для не слишком малых значений приемного сигнала для обеих частот точки ложатся вблизи прямой с наклоном $K = -1$. Таким образом, если удастся показать, что указанная методика справедлива и при временной записи сигнала, то полученный результат означает, что при больших углах места рассеиватели распределены равномерно.

В заключение следует отметить, что предложенная методика при наличии записи \bar{P}_n от дистанции (возможно, и для временной зависимости \bar{P}_n), по-видимому, может быть использована не только при изучении рассеяния от поверхности моря, но и в тех случаях, когда радиоволны рассеиваются средой с большим числом хаотически распределенных элементов (рассеяние в тропосфере и ионосфере).

Итак в настоящей работе:

1. Предложена методика для определения (по зависимости средней мощности, рассеянной от морской поверхности на разных дистанциях) наличия равномерного распределения рассеивающих элементов на поверхности моря.

2. Отмечена необходимость разработки аналогичной методики для временных записей рассеянной мощности. Такая методика может быть обоснована либо теоретически, либо на основании одновременно проведенных экспериментов, в которых будет сравниваться распределение рассеивателей, определенное из пространственных и временных измерений.

3. На основании ограниченного числа опытных данных показано, что при скользящем распространении рассеиватели распределены неравномерно.

Для выяснения вопроса о влиянии формы рассеивателей необходимо проведение одновременных измерений на больших и малых

углах места. Эти опыты желательно провести на разных частотах. Следует также разработать методы расчета рассеяния различными элементами (диски, пластинки и т. п.), которые позволили бы вычислять наклон прямой K . Тогда, определяя K из опыта, представлялось бы возможным установить наиболее вероятную модель рассеивающей поверхности.

В заключение выражаю благодарность Ф. Г. Бассу за дискуссии.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. D. E. Kerr, Propagation of Radio Waves, M. I. T. Radiation Lab. Ser., 13, 481—587 (1951).
2. M. Katzin, Conv. Record, IRE, 1, 72 (1955).
3. D. D. Crombie, Nature, 175, 681 (1955).
4. R. P. Ingalls a. M. L. Stoun, IRE Trans., AP—5, 164 (1957).
5. M. Katzin, Proc. IRE, 45, 44 (1957).
6. J. C. Wiltse, S. P. Schlesinger, C. M. Johnson, Proc. IRE, 45, 220 (1957).
7. C. R. Grant a. B. S. Y aplee, Proc. IRE, 45, 976 (1957).
8. J. L. Pawsey, R. N. Bracewell, Radio Astronomy, Oxford, 244—248, 1955.
9. И. С. Шкловский, Космическое радиоизлучение ГИТТЛ, М., 157—165, 1957.

Харьковский институт радиофизики
и электроники АН УССР

Поступила в редакцию
10 января 1958 г.