УДК 551.521.3:535.36

© *И. Л. Кацев*[1], *Э. П. Зеге*[1], *А. С. Прихач*[1], *B. Cochenour*[2], *L. Mullen*[2]
[1]Институт физики НАН Беларуси, Минск
[2]NAVAIR, Patuxent River, MD, USA
katsev@light.basnet.by

ДЕМОДУЛЯЦИЯ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО ПУЧКА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В МОРСКОЙ ВОДЕ

Исследуется функция передачи модуляции амплитудно-модулированного сигнала в морской воде, которая описывает изменение глубины модуляции в зависимости от частоты модуляции и является важнейшим фактором, определяющим качество оптической связи. Проводится сравнение теоретических расчетов с экспериментом, моделирующим перенос излучения в морской воде. Дается краткое описание используемой экспериментальной установки и сред, моделирующих оптические свойства морской воды. Рассчитывается изменение глубины модуляции сигнала при изменении частоты модуляции, угла наблюдения между осями излучателя и приемника и оптического расстояния между источником и приемником. Теоретические расчеты в рамках многокомпонентного подхода в сочетании с малоугловым диффузионным приближением теории переноса излучения проводятся с использованием программного пакета CLIW (Communication with Light In Water). Показано, что теоретическая модель, заложенная в программный пакет CLIW, позволяет удовлетворительно описывать характеристики амплитудно-модулированного сигнала и оценивать параметры канала связи в морской воде на достаточно больших оптических расстояниях от источника. Отмечается, что для таких сопоставлений необходимо знать индикатрису рассеяния в достаточно широком диапазоне углов. Впервые экспериментально подтвержден эффект, теоретически предсказанный в 1971 г. и заключающийся в том, что глубинный режим для переменной составляющей сигнала может иметь место лишь для некоторой области частот модуляции. При этом максимум углового распределения яркости для переменной составляющей сигнала имеет место не в направлении «вперед», а при некотором угле наблюдения $\theta > 0°$. Положение этого максимума зависит от характеристик среды и частоты модуляции.

Ключевые слова: амплитудно-модулированный пучок, морская вода, глубина модуляции, эксперимент, глубинный режим.

I. Katsev[1], *E. Zege*[1], *A. Prokhach*[1], *B. Cochenour*[2], *L. Mullen*[2]
[1]Institute of Physics, National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus
[2]NAVAIR, Patuxent River, MD, USA
katsev@light.basnet.by

DEMODULATION OF AMPLITUDE-MODULATED BEAM PROPAGATING THROUGH SEAWATERS

The modulation transfer function of an amplitude modulated signal propagating through seawater is explored. This function describes the dependence of the signal modulation depth on modulation frequency in the propagation process and is the most important factor determining the optical communication quality. The experimental data received as the laboratory simulation of the radiation transfer through seawaters are compared to results of the theoretical studies. The deployed experimental set-up and media simulating the optical characteristics of seawaters are briefly introduced. Theoretical studies are performed in the framework of the multi-component approach along with the small-angle diffusion approximation of the radiative transfer theory using the software CLIW (Communication with Light In Water) implementing this theory. It is shown that the theoretical approach deployed in the CLIW software ensures the satisfactorily description of the propagating amplitude-modulated signal characteristics and estimation of the parameters of a communication channel in seawaters

at sufficiently large distances from the optical source. Beside it is noted there is a need to know the media phase function in a fairly wide range of angles for such comparisons. In this work the effect theoretically predicted in 1971 was experimentally confirmed for the first time. This effect consists in the fact that the asymptotic deep mode for the alternative component of the signal can take place only for a certain range of frequency modulation values. The maximum angular intensity distribution for the alternative component of the signal takes place not in the «forward» direction but at a certain observation angle $\theta > 0°$. The position of this maximum depends on the frequency modulation and optical characteristics of medium.

Key words: amplitude-modulated beam, seawater, modulation depth, experiment, asymptotic regime.

Для передачи информации в морской воде с помощью оптических систем связи используется временная модуляция оптических сигналов. При распространении таких сигналов в рассеивающей среде, какой является морская вода, имеет место не только ослабление сигнала, но также и изменение его временных характеристик, что приводит к искажению передаваемой информации. В частности, если источник излучения посылает δ-импульс, т. е. мощность источника описывается функцией $P_s(t) = \delta(t)$, то вследствие конечности скорости света в среде сигнал, поступающий на фотоприемник, описывается функцией импульсного отклика $P_\delta(t)$. В случае произвольной функции импульса источника $P_s(t)$ сигнал на фотоприемнике описывается уравнением свертки

$$P(t) = \int P_s(t')P_\delta(t-t')dt'.$$

Если мощность источника модулирована по гармоническому закону

$$P_s(t) = P_0\left[1+\exp(i\omega t)\right]$$

с частотой модуляции ω, то сигнал на входе фотоприемника имеет вид

$$P(t) = P(\omega=0) + P(\omega)e^{i(\omega t-\varphi(\omega))} = P_0\left[G + T(\omega)e^{i(\omega t-\varphi(\omega))}\right],$$

где $G = P(\omega = 0)/P_0$, $T(\omega) = P(\omega)/P_0$ — функция передачи модуляции, $\varphi(\omega)$ — сдвиг фазы.

Функция G есть коэффициент передачи энергии, который определяет среднюю мощность сигнала, попадающего на фотоприемник. Эта величина в сочетании с функцией передачи модуляции $T(\omega)$ и чувствительностью приемника определяет возможную дальность оптической связи.

Функция передачи модуляции $T(\omega)$, которая описывает изменение глубины модуляции сигнала на данной частоте, является важнейшим фактором, определяющим качество оптической связи. Она связана с функцией $P_\delta(t)$ Фурье-преобразованием

$$T(\omega)e^{-i\varphi(\omega)} = \int P_\delta(t)e^{-i\omega t}dt. \quad (1)$$

В данной работе приводятся результаты теоретического исследования характеристик амплитудно-модулированного сигнала, распространяющегося в морской воде, и сравнение их с результатами эксперимента. Теоретические расчеты проводились с использованием программного пакета CLIW (Communication with Light In Water). Этот пакет позволяет оценивать параметры канала связи в морской воде. В частности, он позволяет рассчитывать коэффициент передачи энергии G, функцию передачи модуляции $T(\omega)$ и фазовый сдвиг $\varphi(\omega)$ практически для любых характеристик морской воды и геометрии эксперимента. В алгоритме CLIW используется многокомпонентный подход (МКП) [1–3] в сочетании с малоугловым диффузионным приближением (МДП) теории переноса излучения [1, 2] и теорией временной растяжки импульса при распространении «вперед» в рассеивающей среде [1, 2, 4]. Заметим, что сочетание МКП с МДП наиболее эффективно при расчете характеристик импульса (или модулированного сигнала) на достаточно больших оптических расстояниях от источника, т. е. в той области, которая представляет наибольший интерес в проблеме оптической связи в морской воде.

Описание эксперимента. Первые эксперименты по изучению демодуляции светового пучка при его распространении в воде были выполнены еще в 1975 г. [5]. В последнее время на новой экспериментальной базе были проведены гораздо более детальные экспериментальные исследования этой проблемы. Результаты этих исследований описаны в работе [6].

Как видно из уравнения (1), чтобы оценить передаточные характеристики канала связи достаточно измерить функцию импульсного отклика канала $P_\delta(t)$. Ключевая идея эксперимента, проведенного в [6], состоит в том, чтобы измерять импульсный отклик не во временной, а в частотной области. Этот подход, использованный в [7–10], был заимствован из работ [11, 12]. Вместо того чтобы проводить единичное широкополосное измерение функции $P_\delta(t)$, можно провести несколько измерений на многих частотах, но с узкой полосой частот. Это позволяет провести измерения в большом динамическом диапазоне с высокой чувствительностью.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Бак для измерений имел ширину 7.62 м и высоту 3.65 м. С помощью прозрачномера измерялся показатель ослабления света *c* на длине волны 532 нм. Для вариации прозрачности воды путем добавления рассеивающего компонента в описываемом эксперименте использовался гидроксид магния ($Mg(OH)_2$).

В качестве источника излучения использовался твердотельный лазер с синхронизацией мод с диодной накачкой и удвоением частоты до 532 нм со средней мощностью 4 Вт. Длительность импульса составляла 10 пс, период повторения был 10 нс. В результате получались частотные гармоники, равномерно распределенные с интервалом 100 МГц.

Небольшое зеркало, которое помещалось на вращающемся основании перед входным окном бака, позволяло изменять угол между осями излучателя и приемника до 30°. Пятиступенчатый высокоскоростной фотодетектор Photonis 37303 помещался за окном на противоположной стороне бака. Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) имел входную апертуру 25 мм и был специально разработан для достижения полосы пропускания до 1 ГГц. С помощью входного объектива и ирисовой диафрагмы поле зрения (FOV) приемника изменялось от 1 до 7 градусов. Для устранения внешних засветок использовался интерференционный фильтр на 532 нм. Динамический диапазон варьировался изменением мощности источника, либо с помощью нейтральных фильтров на приемнике.

Сигнал после ФЭУ разделялся на переменную и постоянную составляющие. Постоянная составляющая сигнала измерялась с помощью мультиметра, а для измерений переменной составляющей использовался микроволновый анализатор спектра.

Полоса разрешения анализатора спектра была 5 кГц, но могла быть снижена до 1 кГц при измерениях в мутной воде при низком уровне сигнала. Возможность сужения ширины полосы частот при измерениях на высоких частотах является преимуществом таких измерений в частотной

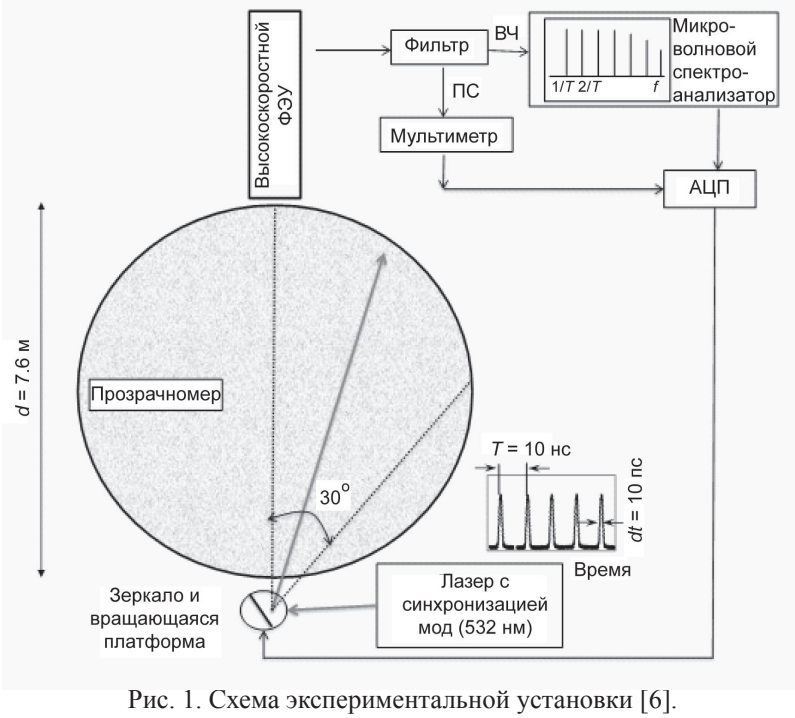

Рис. 1. Схема экспериментальной установки [6].

Источник и приемник находятся напротив друг друга, изменение угла сканирования между осями излучателя и приемника до 30°. ВЧ — высокочастотная составляющая, ПС — постоянная составляющая сигнала, АЦП — аналого-цифровой преобразователь, ФЭУ — фотоэлектронный умножитель.

области. Одновременное измерение постоянной и переменной составляющих сигнала позволяет легко рассчитывать глубину модуляции, которая определяется как отношение переменной составляющей к постоянной, т. е. экспериментально измерять передаточную функцию T(ω).

Аппроксимация индикатрисы рассеяния. Как указано выше, в качестве рассеивающего вещества для изменения прозрачности воды использовался гидроксид магния ($Mg(OH)_2$).

К сожалению, индикатриса рассеяния гидроксида магния измерялась только в диапазоне 0–10°. В то же время, как было показано в [7], существует достаточно сильная чувствительность глубины модуляции распространяющегося луча к оптическим характеристикам рассеивающей среды, и в частности, к индикатрисе рассеяния. Поэтому для правильного количественного сравнения результатов теории и эксперимента по демодуляции модулированного пучка, распространяющегося в рассеивающей среде, необходимо иметь данные об индикатрисе рассеяния не только в области малых углов рассеяния, но во всем диапазоне углов, по крайней мере, в передней полусфере.

В отсутствие экспериментальных данных об индикатрисе рассеяния гидроксида магния в широкой области углов рассеяния, мы попытались оценить ее, хотя бы приблизительно, следующим образом.

Судя по сильной вытянутости этой индикатрисы в области малых углов рассеяния, этот рассеивающий компонент состоит из частиц, много больших длины волны излучения. В этом случае хорошую точность описания индикатрисы рассеяния обеспечивает синтез геометрической оптики (ГО) с дифракцией Фраунгофера. Для краткости введем обозначение ГОФ для такого подхода. В рамках приближения ГОФ индикатриса рассеяния крупных частиц может быть представлена в виде суммы дифракционной $P_{dif}(\beta)$ и геометрооптической $P_{GO}(\beta)$ компонент [13]:

$$P(\beta) = \frac{\sigma_{dif} P_{dif}(\beta) + \sigma_{GO} P_{GO}(\beta)}{\sigma_{dif} + \sigma_{GO}},$$

где σ_{dif} и σ_{GO} описывают дифракционную и геометрооптическую части показателя рассеяния соответственно. Заметим, что такой подход был использован ранее в [14]. Полученная при таком подходе индикатриса рассеяния гидроксида магния представлена на рис. 2 в сравнении с индикатрисой рассеяния морской воды, измеренной вблизи Сан-Диего [15].

Результаты. Результаты сравнения теории и эксперимента представлены на рис. 3. Параметры системы и значения вероятности выживания фотона в эксперименте и в модельных расчетах приведены в таблице. Заметим, что здесь показатель ослабления c измеряется в м$^{-1}$, а вероятность выживания фотона рассчитана в предположении, что добавляемый гидроксид магния вносит только дополнительное рассеяние, а показатель поглощения воды $k \approx 0.1$ м$^{-1}$.

Как и следовало ожидать, при увеличении частоты модуляции и угла сканирования между осями излучателя и приемника глубина модуляции уменьшается. Это уменьшение проявляется

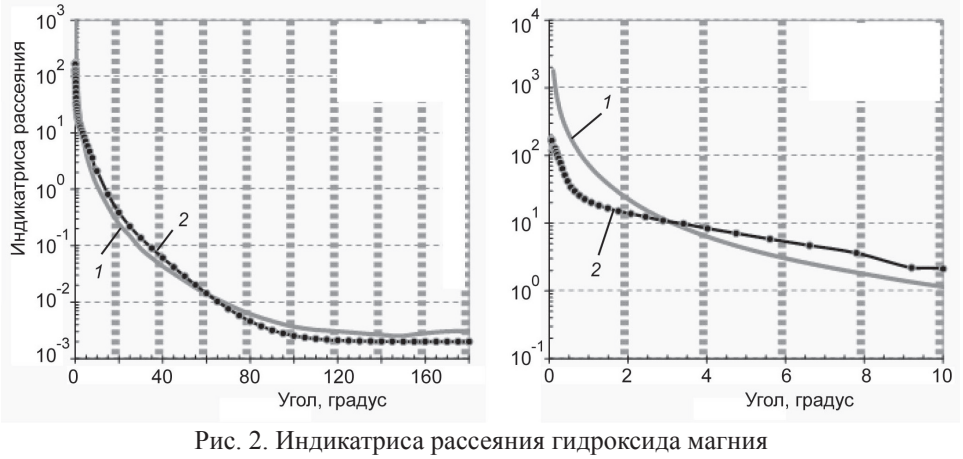

Рис. 2. Индикатриса рассеяния гидроксида магния
в сравнении с индикатрисой рассеяния морской воды «San Diego».
1 — San Diego; *2* — $Mg(OH)_2$.

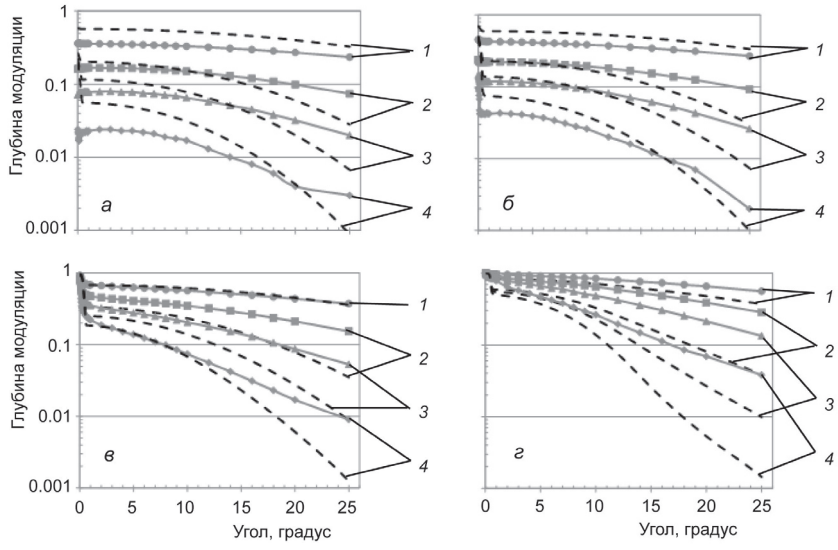

Рис. 3. Изменение глубины модуляции сигнала в зависимости от угла наблюдения при различных значениях оптического расстояния *cz* между источником и приемником для разных частот модуляции.
cz = 19.1 (*а*), 17.6 (*б*), 14.1 (*в*), 9.6 (*г*); *1* – 100, *2* – 300, *3* – 500, *4* – 1000 МГц.
Сплошная линия — эксперимент, штриховая — теоретический расчет.

тем сильнее, чем больше оптическое расстояние между источником и приемником.

Отметим, что результаты сравнения представлены только для относительно больших значений оптической толщины слоя воды, потому что на малых расстояниях от источника использованное при моделировании малоугловое диффузионное приближение не обеспечивает достаточную точность описания углового распределения яркости излучения. Как видно из рис. 3, при больших значениях оптической толщины расчеты по программе CLIW находятся в сравнительно хорошем согласии с экспериментом. Однако когда оптическая толщина среды уменьшается согласие теории и эксперимента становится заметно хуже.

Параметры системы в эксперименте и в модельных расчетах по программе CLIW

Параметры системы	Характеристика
Апертура источника	0.005 м
Поле зрения источника	0.2°
Апертура приемника	0.05 м
Поле зрения приемника	7°

Наблюдаемое на рис. 3 расхождение между экспериментом и теоретическими расчетами может быть обусловлено многими причинами, в том числе:

— несовпадением индикатрисы рассеяния и вероятности выживания фотона в расчетах и в эксперименте;

— недостаточной точностью теории, особенно при описании распространения пучков с большой частотой модуляции.

На больших оптических глубинах при больших частотах модуляции в эксперименте [6] проявилась очень интересная зависимость глубины модуляции от угла сканирования между осями излучателя и приемника (рис. 4).

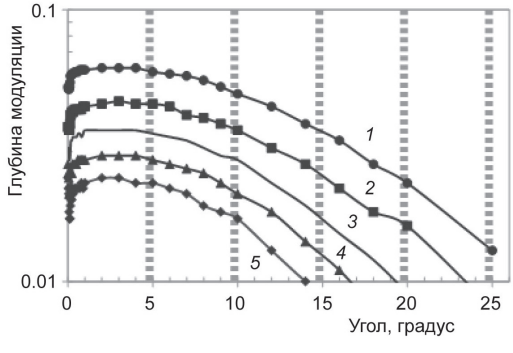

Рис. 4. Изменение глубины модуляции сигнала в зависимости от направления оси приемника, расположенного на оси источника, при *cz* = 19.1.
Частота модуляции: *1* – 600, *2* – 700, *3* – 800, *4* – 900, *5* – 1000 МГц..

Можно видеть, что существует максимум при угле $\theta \neq 0°$, который выражен тем сильнее, чем выше частота модуляции. Заметим, что такой эффект был предсказан независимо в 1970 [16] и 1971 гг. [17] при рассмотрении асимптотического режима в глубине рассеивающей среды в случае освещения ее бесконечно широким модулированным пучком. Однако в эксперименте этот эффект ранее не наблюдался.

Асимптотический режим светового поля на больших оптических глубинах в полубесконечной рассеивающей среде (глубинный режим) является одной из наиболее фундаментальных и хорошо изученных проблем теории переноса излучения. Этот режим характеризуется разделением угловых и пространственных переменных, азимутальной независимостью характеристик светового поля и экспоненциальным затуханием яркости излучения с глубиной [1, 2]. Это означает, что яркость нерассеянного излучения гораздо меньше яркости рассеянного света, а относительное угловое распределение яркости в глубинном режиме и глубинный показатель затухания c_{as} яркости излучения не зависят от глубины.

Глубинный режим для переменной составляющей модулированного пучка был теоретически исследован в [16] для среды с изотропным рассеянием и в [17] для среды с произвольным рассеянием. В [17] было показано, что глубинный показатель затухания возрастает с увеличением частоты модуляции. При некотором значении частоты модуляции ω* он становится равным показателю ослабления c, т. е. $c_{as} = c$. Это означает, что частота ω = ω* является максимальной частотой модуляции, при которой еще можно пренебречь нерассеянным излучением по сравнению с рассеянным для переменной составляющей модулированного пучка. Следовательно, это предельная частота модуляции, при которой еще может реализоваться глубинный режим для переменной составляющей с его специфическими свойствами, которые полностью определяются свойствами среды. Физически это означает, что имеет место столь сильная демодуляция рассеянного света, что на любой оптической глубине среды в переменной составляющей сигнала преобладает нерассеянный свет.

На рис. 5 представлены экспериментальные данные [6] по зависимости амплитуды переменной составляющей модулированного пучка от оптической глубины для разных частот модуляции. Приемник с апертурным углом приема 7° находится на оси пучка, ось приемника направлена на источник. Здесь же показана зависимость от глубины для нерассеянной компоненты излучения (закон Бугера). Видно, что уже при частоте модуляции ω = 1000 МГц амплитуда переменной составляющей модулированного пучка убывает практически по закону Бугера. При меньших частотах виден переход к асимптотическому режиму, когда показатель затухания $c_{as} < c$.

Следует заметить, что когда говорят о глубинном режиме, то имеют в виду случай освещения полубесконечной среды бесконечно широким пучком света. Поэтому, строго говоря, при освещении среды лазерным источником нельзя говорить о глубинном режиме. Тем не менее, можно считать, что на больших оптических расстояниях от источника, когда световое поле сильно «размыто», на оси источника реализуется асимптотический квазиглубинный режим.

В работах [16, 17] было показано, что в глубинном режиме при любом значении вероятности выживания фотона Λ существует такая частота модуляции ω' ≤ ω*, когда на частотах ω, удовлетворяющих условию ω' < ω ≤ ω*, максимум углового распределения яркости для переменной составляющей сигнала имеет место при θ > 0°. Положение этого максимума зависит от характеристик

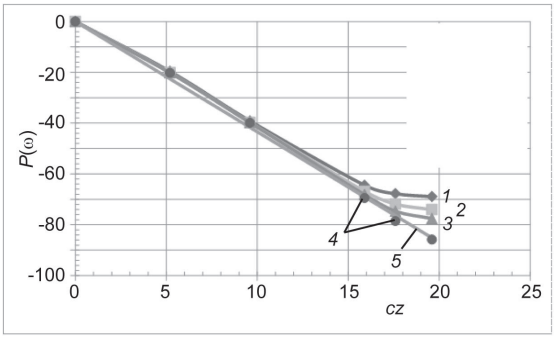

Рис. 5. Зависимость амплитуды переменной составляющей сигнала от оптической толщины среды.
Частота модуляции:
1 – 0, *2* – 100, *3* – 300, *4* – 1000 МГц,
5 – закон Бугера $P = \exp(-cz)$.

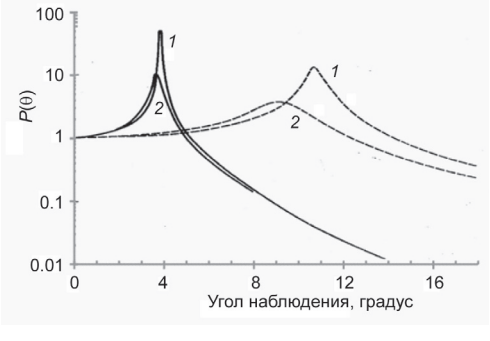

Рис. 6. Зависимость амплитуды переменной составляющей сигнала от угла наблюдения θ в асимптотическом режиме при ω = ω*.
1 — Λ = 0.95, *2* — Λ = 0.2.
Сплошные линии — среднеатмосферная индикатриса, штриховые линии — индикатриса рассеяния на сферических частицах с параметром дифракции ρ = 10 и показателем преломления воды n = 1.33.

среды и частоты модуляции. В качестве примера зависимость амплитуды переменной составляющей от угла наблюдения в асимптотическом режиме при $\omega = \omega^*$ показана на рис. 6, взятом из [17].

Заметим, что экспериментальные данные, приведенные на рис. 4, находятся в разумном согласии с теоретическими результатами, полученными в работе [17]. При этом следует иметь в виду, что апертурный угол приемника в эксперименте (рис. 4) был равен 7°, т. е. значительно больше, чем полуширина максимума на рис. 6. Это может быть одной из причин, почему максимум на рис. 4 выражен не так сильно, как на рис. 6.

Таким образом, можно сделать вывод, что теоретическая модель переноса модулированного излучения в рассеивающей среде типа морской воды, заложенная в программный пакет CLIW, позволяет вполне удовлетворительно описывать характеристики амплитудно-модулированного сигнала и оценивать параметры канала связи в морской воде на достаточно больших оптических расстояниях от источника. Однако при этом необходимо знать индикатрису рассеяния в достаточно широком диапазоне углов.

Детальные экспериментальные исследования, выполненные в [6], позволили подтвердить особенности асимптотического режима в глубине рассеивающей среды в случае освещения ее бесконечно широким модулированным пучком, предсказанные теоретически в работах [16, 17].

References

1. *Zege E. P., Ivanov A. P., Katsev I. L.* Image Transfer through a Scattering Medium. *Minsk, Nauka i tekhnika*, 1985. 327 p. (in Russian).
2. *Zege E. P., Ivanov A. P., Katsev I. L.* Image Transfer through a Scattering Medium. *Heidelberg, Springer-Verlag*, 1991. 391 p.
3. *Zege E. P., Katsev I. L., Polonsky I. N.* Multicomponent approach to light propagation in clouds and mists. *Appl. Optics.* 1993, 32, 2803–2812.
4. *Katsev I. L.* Integral characteristics under nonstationary light scattering. *Dokl. AN BSSR*. 1969, 13, 118–121. (in Russian)
5. *Gordeev L. B., Luchinin A. G., Shchegolkov Yu. B.* Experimental investigation of the structure of a narrow sinusoidally modulated light beam in the model anisotropic scattering medium. *Izv. AN SSSR, Fiz. Atm. Okeana*. 1975, 11, 86–90. (in Russian)
6. *Cochenour B.* Experimental Measurements of Temporal Dispersion for Underwater Laser Communications and Imaging. A dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy. *Raleigh, North Carolina*, 2013.
7. *Mullen L., Alley D., Cochenour B.* Investigation of the effect of scattering agent and scattering albedo on modulated light propagation in water. *Appl. Optics*. 2011, 50, 10, 1396–1404.
8. *Mullen L., Laux A., Cochenour B.* Time-dependent underwater opitcal propagation measurements using modulated light fields. *Proc. SPIE: Ocean Sensing and Monitoring*. 2009, 73170D1–73170D8.
9. *Mullen L., Laux A., Cochenour B.* Propagation of modulated light in water: implications for imaging and communications systems. *Appl. Optics*. 2009, 48, 14, 2607–2612.
10. *Mullen L.* et al. Optical modulation technqiues for underwater detection, ranging, and imaging. *Proc. SPIE: Ocean Sensing and Monitoring III*. 2011, 1–9.
11. *Gloge D., Chinnock E. L., Ring D. H.* Direct measurement of the (Baseband) frequency response of multimode fibers. *Appl. Optics*. 1972, 11, 7, 1534–1538.
12. *Helkey R. J.* et al. Millimeterwave signal generation using semiconductor diode lasers. *Microwave and Optical Technology Letters*. 1993, 6, 1, 1–5.
13. *Shifrin K. S.* Scattering of light in a turbid medium. *Moscow, Gostekhteorizdat*, 1951. 288 p. (in Russian).
14. *Zege E. P.* et. al. Simple model of the optical characteristics of bubbles and sediments in seawater of the surf zone. *Appl. Optics*. 2006, 45, 6577–6585.
15. *Jerlov N. G.* Marine Optics. *New York, Elsevier*, 1976.
16. *Luchinin A. G., Saveliev V. A.* Asymptoty of sinusoidal modulated radiation field in isotropically scattering medium. *Izv. Vuz., Ser. Radiofiz*. 1970, 13, 1789–1793. (in Russian)
17. *Katsev I. L.* The asypthotic regime in the deep layers of a scattering medium illuminated by a sinusoidally modulated light beam. *Izv. AN SSSR, Ser. Fiz. Atm. Okeana*. 1971, 7, 212–218. (in Russian).

Статья поступила 04.04.2014 г.