

К определению показателя преломления атмосферы для высокоточных геодезических измерений.

А.В. Кошелев

При выполнении высокоточных геодезических измерений определение скоростей распространения электромагнитных волн в диспергирующих средах (ДС) к которым относится земная атмосфера, имеет важное научное и практическое значение. Как известно, диспергирующими являются такие среды, показатель преломления которых зависит от частоты волны.

В современной литературе фазовая и групповая скорости волн в ДС и, соответственно, их показатели преломления в равной степени участвуют в количественной и качественной оценке, как самих физических явлений, так и измеряемых с их применением параметров [1,2]. В настоящей работе рассматривается вопрос о правомочности использования понятия фазовой скорости для обработки геодезических измерений в диспергирующей земной атмосфере.

Известно, что фазовая скорость существует лишь для строго монохроматических волн на бесконечно большом интервале времени [3]. В то время как реальные волны не удовлетворяют условию монохроматичности и бесконечной продолжительности. К основным факторам немонохроматичности реальных волн относятся [3]:

- модуляция волн случайными процессами, сопровождающими генерацию волн;
- ограничение (модуляция) по времени функцией включения и выключения;
- дискретный характер излучений, например, в виде квантов света.

Отсюда следует вывод, что в природе идеальные гармонические (монохроматические) волны отсутствуют, следовательно, и фазовой скорости в ДС не существует. Использование фазовой скорости для реальных волн полностью оправдано лишь для недиспергирующих сред.

В учебниках по оптике, включая и специальную литературу [1-3], для объяснения физических эффектов при распространении волн в ДС часто используется понятия фазового показателя преломления. Иногда, термин показатель преломления в ДС приводится без указания к какой скорости он относится к фазовой или групповой [5,6]. Причину этого явления автор видит в существующей противоречивости и недоопределенности изложения этих вопросов в отечественной и зарубежной литературе, что частично дезориентирует читателя. Например, в литературе [3] указывается, что любые реальные волны не являются монохроматическими, а, следовательно, распространяются в ДС только с групповыми скоростями. Однако в этих же книгах при из-

ложении теории и решении практических задач переходят к фазовым скоростям в ДС, обсуждая их как фактически существующие.

Обычно, распространение модулированных волн в ДС излагается с использованием фазовой скорости - для несущих волн и групповой скорости - для огибающих модулированных волн [3,4]. Такое положение существенно искажает как реальную физическую картину исследуемых процессов и явлений, так и интерпретацию результатов измерений. Например, в работе [4] приводится утверждение, что фазовая скорость гауссова пучка в волноводных оптических системах больше скорости света в вакууме. В действительности, и несущие волны, и переносимые ими модулирующие волны в диспергирующих средах распространяются только с групповыми скоростями, не превышающими скорость света в вакууме.

В качестве наглядного примера рассмотрим рекордно стабилизированное излучение лазера, используемое в качестве квантового стандарта частоты [7].

Его относительная нестабильность частоты может оцениваться величиной порядка $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \cong 10^{-16}$, где $\Delta\omega$ - уход частоты, а ω_0 - среднее значение частоты

излучения за промежутки времени, устанавливаемый для кратковременной или долговременной стабильности частоты. Следовательно, реальная оптическая волна даже стабилизированная всегда модулирована частоте случайным процессом и поэтому распространяется в ДС только с групповой скоростью [3,9].

Учитывая, что частота излучения реальной волны непрерывно во времени меняется, то для текущего значения частоты $\omega(t)$ через бесконечно малый промежуток времени dt имеет место, приращение частоты $d\omega$, а ему в ДС будет соответствовать приращение волнового числа dk . Поэтому скорость реальной волны в ДС, есть только групповая скорость, которая определяется уравнением [3]

$$V_g(\omega) = \frac{d\omega}{dk}.$$

В данной работе принципиальным отличием от известных подходов является утверждение, что каждая спектральная составляющая реальной волны в диапазоне частот $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$ распространяется в ДС с групповой скоростью $V_g(\omega)$, а не с фазовой, как это излагается в существующей литературе. Спектральные составляющие такого сигнала также являются модулированными по своему случайному закону для каждой конкретной частоты ω в полосе частот $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$.

Отсюда следует два важных для практического применения вывода:

- определенная ранее экспериментально, так называемая фазовая скорость, в действительности является групповой скоростью и должна использоваться для реальных волн;

- то, что ранее называлось групповой скоростью, определенной по фазовой скорости через соотношение Рэлея в действительности является некорректным ее значением, поскольку как отмечено выше фазовой скорости для

реальных волн не существует [9]. Эти заключения основаны на том, что идеальных монохроматических волн пригодных для практического определения их фазовой скорости в природе не существует.

Перейдем к рассмотрению возможностей применения, предложенного автором подхода для решения конкретных задач.

1. Распространение радиоволн в ионосфере.

В ионосфере наиболее наглядно проявляется физическое отсутствие фазовой скорости, как реального параметра. В этом случае при использовании только групповых скоростей реальных радиоволн и их спектральных составляющих в диспергирующей ионосфере с аномальной рефракцией выявляются следующие преимущества. В методическом аспекте отпадает необходимость объяснять, что фазовая скорость радиоволн в ионосфере «может превышать скорость света в вакууме». Поскольку нет фазовой скорости, то и нет волн распространяющихся со скоростью большей, чем скорость света в вакууме.

Однако автор не отрицает возможности использования фазовой скорости в ДС, как гипотетического параметра, применяемого для чисто теоретических исследований там, где без этого нельзя обойтись. При этом необходимо указание на теоретическую направленность вводимого параметра. Однако вывод групповой скорости по теоретическим значениям фазовой скорости не является точным и на практике для этих целей пользуются результатами экспериментальных определений групповых скоростей или дисперсионными методами измерений группового среднеинтегрального показателя преломления ионосферы, как это делается при выполнении GPS-измерений [7].

2. Распространение оптических волн в атмосфере.

В настоящее время фазовый и групповой показатели преломления оптических волн в атмосфере повсеместно используются в астрономии, геодезии и других областях науки и техники для расчета скоростей волн и учета влияния атмосферы на результаты угловых и линейных измерений, в специальных системах наведения лазерного и оптического излучения и других областях науки и техники.

Конкретно, отметим широкое использование фазового показателя преломления в ДС:

- в интерферометрии при измерении расстояний и в интерферометрах-рефрактометрах для определения показателя преломления среды;
- в дисперсионной угловой рефрактометрии, а также для определения поправок за рефракцию инструментальными интерференционными методами [2].

Групповой показатель преломления используется для определения скорости распространения света в импульсной и модуляционной фазовой ла-

зерной дальнометрии, дисперсионной рефрактометрии с использованием внешней модуляции [2].

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время автором основополагающих работ по определению коэффициента преломления воздуха для оптических волн в атмосфере является шведский ученый Эдлен (Edlen) [5,6]. Однако в своих работах он использует лишь термин показатель преломления - «refractive index» и не дает определения, для какого показателя преломления его формулы получены фазового или группового. В технической литературе определенное Эдленом значение показателя преломления в результате замены реального квазимонохроматического излучения - идеальным монохроматическим получило название фазового показателя преломления (phase refractive index). Это явилось прямым следствием ошибочного мнения о реальности существования фазовой скорости в диспергирующей среде. Значение показателя преломления в зависимости от длины волны Эдлен получил из обработки результатов интерферометрических измерений [6], используя аппроксимацию наблюдений с применением реального излучения, которое, как это показано выше, распространялось с групповой скоростью. В классическом учебнике по оптике Борна и Вольфа указывается (стр. 43): «В самом деле, легко видеть, что фазовую скорость нельзя определить экспериментально и поэтому следует считать ее лишенной какого-либо прямого физического смысла». Таким образом, им фактически был определен групповой показатель преломления (group refractive index), а не фазовый, как это принято считать в существующей литературе [1-3].

В результате возникла ситуация при которой замена названия фазового показателя преломления на групповой не меняет правильности использования показателя преломления, полученного Эдленом, для определения скорости и направления оптических волн при решении названных выше задач. На основании сказанного, уточненная формула Эдлена для стандартных условий, в виде группового, а не фазового показателя преломления в форме Зельмейера может быть представлена уравнением [6]:

$$(n_{0g} - 1)10^6 = 83.4213 + \frac{24060.30}{(130 - \sigma^2)} + \frac{159.97}{(38.9 - \sigma^2)}, \quad (7)$$

где $\sigma = \frac{1}{\lambda}$ - волновое число в мкм^{-1} , λ - длина волны в мкм .

Это формула получена по экспериментальным результатам измерений, для условий $T_0 = 288.15^\circ\text{K}$ - температура в градусах Кельвина ($t_0 = 15^\circ\text{C}$), $P_0 = 1013.25 \text{ мб}$ - давление (760мм. рт. ст.), влажность «сухой воздух» и 0.03% углекислого газа в воздухе).

Эта же формула без потери точности может быть представлена в форме уравнения Коши

$$(n_{g0} - 1)10^6 = 272.6129 + \frac{1.5294}{\lambda^2} + \frac{0.01367}{\lambda^4}. \quad (8)$$

Практические проблемы возникают как раз с использованием так называемого раньше группового показателя преломления оптического излучения для стандартных условий, поскольку для его получения использовалась формула Рэлея

$$n_{g0} = n_{ph0} - \lambda \left(\frac{dn_{ph0}}{d\lambda} \right). \quad (9)$$

Ошибка заключалась в том, что в эту формулу подставляли значения уже группового показателя преломления (8), который назывался раньше «фазовым показателем преломления» n_{ph0} . Таким образом, в модуляционных фазовых и импульсных лазерных дальномерах вместо уравнения (8) используется некорректная формула

$$(n_{g0} - 1)10^6 = 272.6129 + \frac{3 \cdot 1.5294}{\lambda^2} + \frac{5 \cdot 0.01367}{\lambda^4}. \quad (10)$$

Существует возможность, как и в предыдущем случае для радиоволн в ионосфере, определить теоретическое значение фазового показателя преломления света в атмосфере n_{ph0} . Будем искать фазовый показатель преломления в следующем виде

$$(n_{ph0} - 1) \cdot 10^6 = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}, \quad (11)$$

где А, В и С – постоянные коэффициенты. Подстановка выражения (11) в (9) позволяет получить известное уравнение (8), представленное в следующем виде,

$$(n_{g0} - 1) \cdot 10^6 = A + \frac{3 \cdot B}{\lambda^2} + \frac{5 \cdot C}{\lambda^4} = 272.6129 + \frac{3 \cdot 0.5098}{\lambda^2} + \frac{5 \cdot 0.002734}{\lambda^4}. \quad (12)$$

Отсюда находим искомые значения коэффициентов $A = 287.6129$, $B = 0.5098$ и $C = 0.002734$ в уравнении (11), что позволяет представить фазовый показатель преломления идеализированной волны для стандартных условий уравнением

$$(n_{ph0} - 1) \cdot 10^6 = 272.6129 + \frac{0.5098}{\lambda^2} + \frac{0.002734}{\lambda^4}. \quad (13)$$

Значение фазового показателя преломления может быть использовано как для оценки искажения измерений при замене реального группового на идеальный фазовый показатель преломления, так и для исследований и построения теоретических математических моделей ДС [9].

Для условий отличных от стандартных групповой показатель преломления воздуха можно вычислить, используя формулы Баррелла и Сирса []

$$(n_g - 1) \cdot 10^6 = (n_{g0} - 1) \cdot 10^6 \frac{T_0 \cdot P}{P_0 \cdot T} - \left(17.045 - \frac{0.5572}{\lambda^2} \right) \frac{e}{T}. \quad (14)$$

Использование ошибочного значения группового показателя преломления могло служить причиной неудач при создании двух и трехволновых модуляционных лазерных светодальномеров-рефрактометров, позволяющих учитывать среднеинтегральное значение показателя преломления атмосферы. Активные попытки создания таких приборов предпринимались в 70-х годах прошлого столетия [2].

Очень важным является использование групповых скоростей в ДС активных сред квантовых стандартов частоты (КСЧ) с рекордной стабильностью синхронизированных мод, создаваемых периодической последовательностью фемтосекундных лазерных импульсов [8]. В таких стандартах сетка стабилизированных частот создается гармониками огибающей периодической последовательности фемтосекундных импульсов. На основе таких стандартов частоты планируется создание эталонов длины. Здесь источником дополнительных погрешностей, может служить предлагаемый в работе [8] переход от так называемой «фазовой скорости несущих волн» к групповой скорости гармоник огибающей фемтосекундных импульсов. Это приведет к искажению результатов определений длин волн, что может негативно сказаться на точности эталона длины, как это было показано выше в примере для модуляционных лазерных дальномеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камен Х. Электронные способы измерений в геодезии.- М.: Недра.- 1982.- 251с.
2. Прилетин М.Т., Голубев А.Н. Инструментальные методы геодезической рефрактометрии. «Итоги науки и техники», «Геодезия и аэро съемка» 1979, т.15.-89 с.
3. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика.- М.: Наука, 2004. – 654с.
4. Хаус Х. Волны и поля в оптоэлектронике. М.: Мир, 1988. С. 131.
5. Edlen B J. Opt. Soc. Am. **43** 339 (1953).
6. Edlen B Metrologia, **2**(2) 12 (1966).
7. Grewal S, Weil L, Andrews F, Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration (Jon Willey&Sons, Inc. 2001)
8. Reichert J et al. Opt. Commun., **172**, 59 (1999).
9. Кошелев А.В. Сб. матер.V междунар. научн. конгр. «ГЕО-Сибирь-2009».-Т.5, ч.1.-С.