

© А.Н. БОГАТУГОВ, К.П. ГАЙКОВИЧ, А.С. ГУРВИЧ,
В.К. ИВАНОВ, С.С. КАШКАРОВ, С.Н. КРИВОНОЖКИН,
А.С. СМИРНОВ, В.Д. ФРЕЙЛИХЕР, Б.М.ШЕВЦОВ

**О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТРАЖАЮЩИХ СЛОЕВ
В ТРОПОСФЕРЕ НАД МОРЕМ ПО
ВАРИАЦИЯМ УРОВНЯ РАДИОСИГНАЛОВ ИСЗ**

(Представлено академиком В.И. Ильичевым 16 III 1990)

При приеме радиоволн со спутника на антенну, приподнятую над морской поверхностью, в условиях спокойной атмосферы и малого волнения регистрируемая интерференционная картина имеет регулярный характер и на малых углах возвышения ИСЗ чувствительна к влиянию атмосферы. В [1] по искажению наблюдаемых интерференционных картин (по сдвигу минимумов) оценивались параметры моделей вертикального распределения показателя преломления атмосферы:

$$n(z) = 1 + 10^{-6}N(z)$$

где $N(z)$ -индекс рефракции, z - высота над уровнем моря.

В данной работе обсуждаются наблюдения уровня сигналов радионавигационных ИСЗ, проводившиеся в различных районах Тихого океана. Результаты обработки этих наблюдений показали, что в ряде случаев наблюдается не отмечавшаяся ранее почти периодическая модуляция основной интерференционной картины, обусловленная отражением от слоистых неоднородностей тропосферы. Период модуляции в 2—20 раз меньше периода основной интерференционной картины. Случай такой модуляции можно отличить от всех других искажений по ее регулярности. По отношению периода модуляции к периоду регулярной интерференции можно оценивать высоту эффективно отражающего слоя, а по длительности наблюдаемой модуляции можно сделать некоторые заключения о его горизонтальной протяженности.

В измерениях в качестве источников радиосигналов использовали ИСЗ доплеровской радионавигационной системы TRANSIT [2]. ИСЗ этой системы находятся на почти полярных и почти круговых орбитах высотой около 1100 км, передатчики ИСЗ непрерывно излучают два когерентных сигнала на несущих частотах около 150 и 400 МГц.

Наблюдения проводили в 11-м рейсе нис "Академик Александр Виноградов" (1988г.) и в 16-м рейсе нис "Академик Александр Несмеянов" (1989г.), всего проведено 240 наблюдений. Спиральная антенна приемника была установлена на высоте 20 м над уровнем моря, ширина диаграммы антенны составляла 40° . Использовался усовершенствованный авторами приемник типа MAGNAVOX-702, предназначенный для приема сигналов ИСЗ TRANSIT. Полоса пропускания приемного тракта в режиме измерений уровня сигнала составляла 200 Гц на обеих частотах, что обеспечивало отношение сигнал—шум до 40 дБ при нахождении ИСЗ на горизонте. Управление настройкой приемника (с учетом доплеровского сдвига частоты), его чувствительностью, переход в режим приема информации и ее расшифровка производились при помощи ЭВМ ДВК-3.

Для правильной ориентации приемной антенны, получения данных для программы управления режимами работы приемника, его настройки перед каждым сеансом приема проводился расчет ожидаемого положения ИСЗ относительно пункта наблюдения. Измерения уровня осуществляли при угле возвышения ИСЗ $\theta < 10^\circ$, прием информации об орбитальных параметрах ИСЗ — при $\theta \geq 10^\circ$.

Независимые измерения профиля $N(z)$ проводили с помощью радиорефрактометра, поднимавшегося на воздушном шаре до высоты 1 км. В основу рефрактометра положена доработанная схема Крейна [3]. В поднимаемой части находятся измерительный резонатор и генератор, струнный датчик давления и радиопередатчики. Изменение резонансной частоты открытого резонатора и данные датчика давления передаются в стационарную часть аппаратуры по радиоканалам. Аппаратурная нестабильность комплекса для измерений индекса рефракции составляет 0,5 N -единиц, потоянная времени 1 мс. Датчик позволяет оценивать высоту с точностью до 10 м.

На графике рис. 1 показан характерный вид двухлучевой интерференционной картины, наблюдаемой при измерении угла возвышения θ .

Существенные искажения регулярной интерференционной структуры наблюдаются довольно часто, в ряде случаев появляется сильная квазипериодическая модуляция (СКМ) с амплитудой до 20 дБ, "период" которой гораздо меньше периода основной интерференционной структуры. На рис. 2 показан пример такой модуляции (данные получены в районе Курильских островов в сентябре 1989 г.). Глубина модуляции и период может изменяться как от наблюдения к наблюдению, так и во время одного наблюдения.

Наиболее часто СКМ проявляется на частоте 150 МГц, иногда одновременно модулирована и картина на частоте 400 МГц (как на рис. 2, кривая 2 в области $-1 < \theta < 0^\circ$), но гораздо чаще на частоте 400 МГц одновременно наблюдается падение уровня сигнала в некотором интервале углов на 10—15 дБ. В двух наблюдениях модуляция возникла только на частоте 400 МГц. Наиболее яркие проявления модуляции встретились приблизительно в 20% наших измерений.

В единственном случае модуляция наблюдалась и при восходе, и при заходе одного и того же ИСЗ (точки касания лучом поверхности моря на восходе и заходе разделены расстоянием 36км), во всех остальных случаях СКМ появлялась только на восходе или только на заходе ИСЗ. Область углов возвышения, в которой наблюдается СКМ, как правило, лежит в пределах $-1 < \theta < 3^\circ$. Наличие СКМ сопровождается изменением углов возвышения, при которых появляется (пропадает) сигнал ИСЗ при его восходе (заходе).

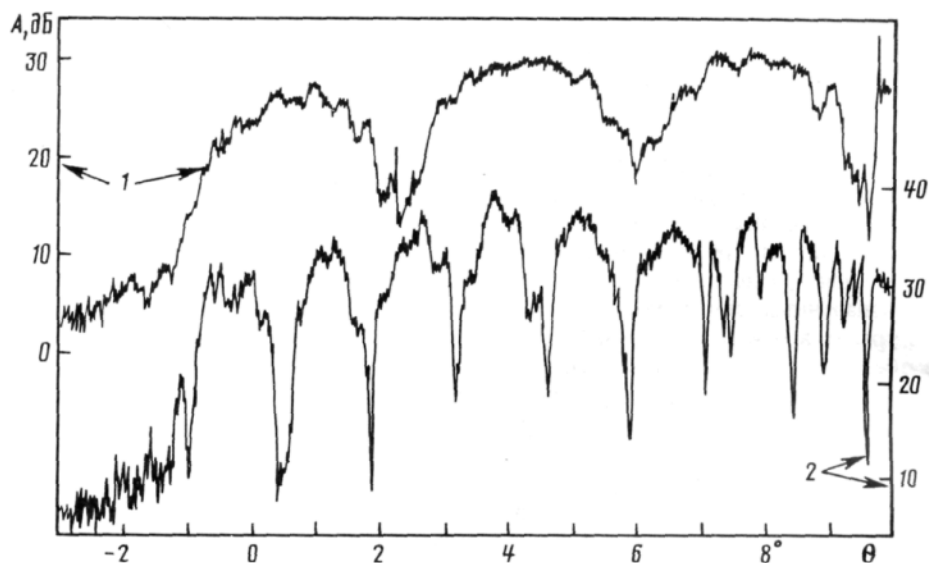


Рис. 1. Характерный вид интерференционной картины при слабом волнении и однородной тропосфере: 1 - 150, 2 - 400 МГц; измерения на обеих частотах произведены одновременно

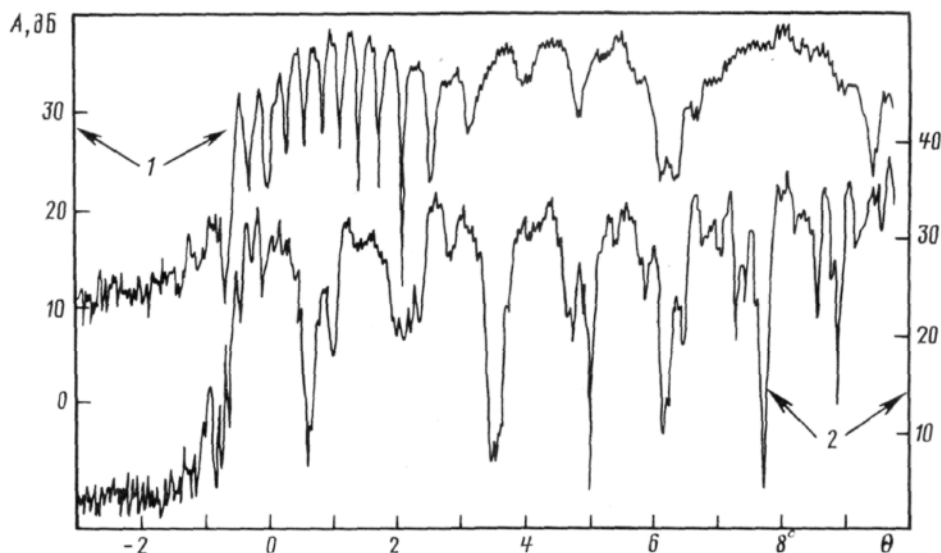
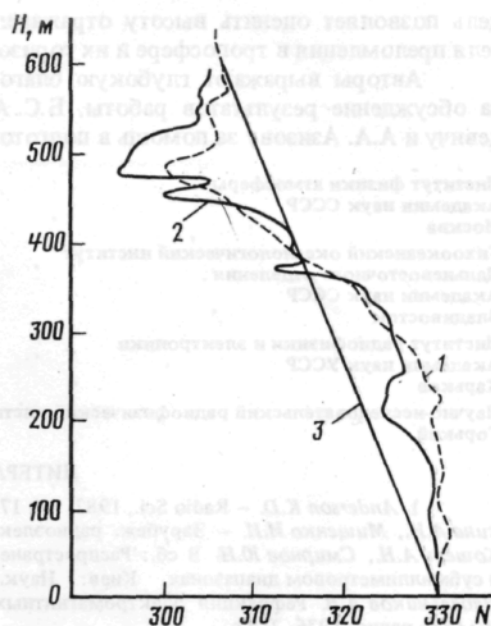


Рис. 2. Случай сильной квазипериодической модуляции интерференционной картины: 1 - 150, 2 - 400 МГц; 9 IX 1989, 20 ч 17 мин местного времени

Одновременно с измерениями, результаты которых представлены на рис. 2, измерялся профиль $N(z)$.

На графиках рис. 3 представлены 2 реализации (детали с вертикальным размером ~ 10 м сглажены) и профиль, соответствующий стандартной атмосфере [4]. Видно, что в это время существовал инверсионный слой с толщиной 250—300 м и перепадом индекса преломления 30—35 N -единиц. Нижняя граница слоя находилась на высоте приблизительно 250 м. Ближе по времени к измерению рис. 2 появился второй слой с толщиной около 50 м и нижней границей на высоте приблизительно 200 м.

Рис. 3. Высотный профиль показателя преломления: 91X1989; 1 - 18 ч 22 мин, 2 - 19 ч 45 мин, 3 - стандартная атмосфера



Все это время структуры сигналов, аналогичные рис. 2 (где представлена реализация с наибольшей СКМ), повторялись, преимущественно при приеме излучения с южного направления.

Приведенные данные позволяют предположить, что СКМ основной интерференционной картины обусловлена наличием частично-отражающих слоев в тропосфере. Следует отметить значительную горизонтальную неоднородность условий, которые приводят к появлению СКМ, и зависимость СКМ от длины волны излучения.

Для обоснования предположения, что СКМ связана с отражением от инверсионного слоя в атмосфере, рассмотрим простейшую модель — очень тонкий частично-отражающий слой, на

некоторой высоте $z = H$. Учитывая только однократное отражение от слоя (что дает интерференцию 4 лучей) и считая морскую поверхность идеально отражающей плоскостью, нетрудно получить простое выражение, описывающее интенсивность

$$(1) \quad I(\theta) = 2(1 - k)^2 \{1 - \cos[(4\pi h/\lambda) \sin \theta]\} \{1 + k - 2k \cos[(4\pi H/\lambda) \sin \theta]\},$$

где $I(\theta) = A(\theta)$, $A(\theta)$ - амплитуда сигнала, λ - длина волны излучения, h - высота расположения антенны, k — коэффициент отражения от слоя (не зависит от λ). Результаты расчетов по (1) содержат основные качественные особенности СКМ. Из (1) следует, что отношение периода основной интерференционной структуры θ_n к "периоду" СКМ θ_M обратно пропорционально отношению высоты антенны h к высоте слоя H , ответственного за СКМ. Таким образом, можно оценить высоту H по формуле

$$(2) \quad H = h\theta_n/\theta_M.$$

Во всех случаях, когда наблюдения СКМ сопровождались измерениями профиля $N(z)$, оценки значения H по параметрам СКМ согласуются с высотами нижних границ слоев с большим градиентом показателя преломления.

Из сопоставления результатов наблюдений уровня сигналов ИСЗ вблизи горизонта с одновременно полученными профилями $N(z)$ можно сделать вывод, что СКМ основной интерференционной картины обусловлена дополнительной интерференцией в точке приема волн, отразившихся от слоя. Простая модель (1) позволяет при наблюдении СКМ оценивать высоту отражающего слоя, однако она не в состоянии объяснить деталей "тонкой структуры" принимаемого сигнала и особенностей при наблюдении на двух длинах волн. Для этого требуется учесть большое число факторов, влияющих на распространение волн в атмосфере: угловую и частотную зависимости коэффициентов отражения, многолучевость, — и, по-видимому, использовать более корректное описание волнового поля. Однако при наличии ярко выраженной СКМ даже рассмотренная выше простая четырехлучевая мо-

дель позволяет оценить высоту отражающих слоистых неоднородностей показателя преломления в тропосфере и их горизонтальную протяженность.

Авторы выражают глубокую благодарность В.И. Кляцкину и К.В. Кошелю за обсуждение результатов работы, Б.С. Агровскому, В.Н. Митрофанову, И.Л. Вунцевичу и А.А. Азизову за помощь в подготовке и проведении измерений.

**Институт физики атмосферы
Академии наук СССР
Москва**

**Поступило
16 IV 1990**

**Тихоокеанский океанологический институт
Дальневосточного отделения
Академии наук СССР
Владивосток**

**Институт радиофизики и электроники
Академии наук УССР
Харьков**

**Научно-исследовательский радиофизический институт
Горький**

ЛИТЕРАТУРА

1. *Anderson K.D.* - Radio Sci., 1982, vol. 17, № 3, p. 653-663.
2. *Волосов П.С., Волынкина А.И., Мищенко И.Н.* - Зарубеж. радиоэлектроника, 1979, № 1, с. 3-34.
3. *Иванов В.К., Кошель А.Н., Смирнов Ю.Н.* В сб.: Распространение и дифракция радиоволн в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Киев: Наук. думка, 1984, с. 72-76.
4. *Колосов М.А., Шабельников А.В.* Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. М.: Сов. радио, 1976. 218с.