



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**Учреждение Российской академии наук
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
им. В.А.КОТЕЛЬНИКОВА РАН**

V Всероссийская Микроволновая конференция



29 ноября – 1 декабря 2017 г.

ДОКЛАДЫ

МОСКВА – 2017г.



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Учреждение Российской академии наук
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
им. В.А.КОТЕЛЬНИКОВА РАН

V Всероссийская Микроволновая конференция¹

29 ноября – 1 декабря 2017 г., Москва

ДОКЛАДЫ

Организаторы конференции:

- Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН
- ОНИТ РАН
- Научный совет РАН по распространению радиоволн
- Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова (РНТОРЭС им. А.С.Попова)
- MTT-ED Moscow Chapter IEEE

Информационная поддержка: [Журнал Радиоэлектроники](http://jre.cplire.ru/) <http://jre.cplire.ru/>

Любая часть материалов может быть скопирована, воспроизведена либо использована каким-либо другим образом только с письменного согласия редакции JRE (Журнал Радиоэлектроники) либо авторов публикаций. При использовании материалов и/или результатов публикаций авторов для научной работы ссылка на материалы настоящей конференции является ОБЯЗАТЕЛЬНОЙ.

©Издание JRE – ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва 2017 г.

¹ при поддержке **РФФИ** (грант No. **№ 17-07-20576**)

МОСКВА 2017

V Всероссийская Микроволновая конференция

Председатель программного комитета конференции

чл.-корр. РАН В.А. Черепенин

Председатель оргкомитета конференции

проф. В.А. Калошин

Зам. председателя оргкомитета

проф. В.П. Кошелец

Программный комитет конференции:

Бондарев Ю.С. (ЦНИРТИ им. А.И.Берга), Бугаев А.С. (МФТИ), Гуляев Ю.В. (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Денисов Г.Г. (ИПФ РАН), Калошин В.А. (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Кошелев В.И. (ИСЭ СО РАН), Кошелец В.П. (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Куликов Г.В. (МИРЭА), Лагарьков А.Н. (ИТПЭ РАН), Левитан Б.А. (АО «Радиофизика»), Мирошникова И.Н (МЭИ), Федоров И.Б. (МГТУ им. Баумана), Чаплыгин Ю.А. (МИЭТ), Шевцов В.А.(МАИ).

Организационный комитет конференции:

Ермолов П.П. (СевГУ), Кисель В.Н. (ИТПЭ РАН), Колесов В.В. (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Крюковский А. С. (РосНоу), Кузнецов Ю.В. (МАИ), Смирнов В.М. (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Пожидаев В.Н. (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Самсонов Г.А. (РНТОРЭС им. Попова), Скобелев С.П. (ПАО «Радиофизика»), Курочкин А.П. (НПО «Вега»), Калябин Е.В.(ЦНИРТИ им. А.И.Берга), Черепенин В.А (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Юханов Ю.В. (ЮФУ).

Тематика конференции

- ✓ Распространение и рассеяние электромагнитных волн
- ✓ Антенные системы и линии передачи
- ✓ Генераторы, усилители, приемные устройства
- ✓ Техника СВЧ, КВЧ и ТГц диапазонов
- ✓ Новые материалы для радиоэлектроники
- ✓ Измерительные системы, в том числе для медицины.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТРОПОСФЕРЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ НА БПЛА

Михайлов М.С.¹, Лобанов А.В.¹, Пермяков В.А.¹, Реганов В.М.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»

mihailovms@mail.ru, valerypermyakov@yandex.ru

² Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

vladislav.reganov@novsu.ru

Излагаются методические аспекты определения индекса преломления нижней тропосферы по измерениям метеопараметров датчиками, установленными на БПЛА. Приводятся результаты измерений вертикального профиля модифицированного индекса преломления в береговой зоне Черного моря.

Введение

Последние годы большое внимание уделяется изучению сверхдальнего загоризонтного распространения радиоволн (РРВ) СВЧ диапазона в связи с задачами радиолокации и радиосвязи. Физическая картина РРВ за пределами радиогоризонта (определенного в приближении нормальной тропосферы) в настоящее время в основных чертах ясна и обусловлена структурой показателя преломления (ПП) тропосферы. Принято анализировать РРВ в тропосфере, базируясь на следующих трех моделях:

1. Модель, основанная на учете только вертикального профиля ПП [1]. Эту модель используют для всей толщи тропосферы, либо для определенных интервалов высот, задаваясь аналитическими аппроксимациями или экспериментальными данными ПП.

2. Модель слоистой тропосферы, в рамках которой согласно экспериментальным данным на плавном в среднем профиле ПП наблюдаются относительно резкие колебания ПП в интервале до двух десятков N-единиц при толщине слоев десятки метров и горизонтальной дальности до десятков и сотен километров [1].

3. Мелкомасштабные флуктуации ПП со значениями среднеквадратичного отклонения ПП $\sqrt{N} \approx 0,5...1,5$ [1,2].

Предполагая, что исходные данные для указанных моделей тропосферы известны, обсудим, какие конкретные механизмы загоризонтного РРВ могут реализоваться в реальных условиях.

Прежде всего, представляют интерес волноводные механизмы РРВ в нижней тропосфере. Эффекты волноводного распространения были обнаружены экспериментально ещё в 40-ых годах прошлого века и детально обсуждались в работе [3]. Волноводное РРВ может быть обусловлено волноводами испарения (ВИ), приповерхностными либо приподнятыми волноводами. Наиболее изучены к настоящему времени ВИ. Предложены различные формы профилей индекса преломления в ВИ, из которых наиболее часто используется базирующийся на теории Колмогорова–Обухова профиль Паулуса–Ешке [4, 5]. Вероятность появления ВИ в тропиках — 100%. Среди последних работ в этом направлении отметим [6]. Приповерхностный волновод нестабилен и с определенной вероятностью возникает вследствие формирования слоистой структуры ПП в различных районах земного шара на высотах до 100–150 м [7]. Приподнятый волновод создается слоями, возникающими на высотах до 4–5 км. Экспериментальные данные по высоте ВИ и приповерхностного волновода приведены в рекомендациях МСЭ [7]. РРВ в различных типах волноводов может быть проанализировано методами геометрической оптики [8] и параболического уравнения [9]. На современном этапе исследований РРВ в тропосферных волноводах анализируют с заданием модельных законов ПП для отдельных типов волноводов либо для комбинированных волноводов, объединяющих несколько типов [6, 10].

В применении к практическим ситуациям будем различать *вероятностный прогноз* РРВ, базирующийся на статистических данных о формировании волноводов в тропосфере, позволяющий понять принципиальные закономерности РРВ без жесткой привязки к моменту работы РЛС, и *оперативный прогноз*, основанный на измерениях профиля ПП тропосферы одновременно с работой РЛС и позволяющий дать трактовку результатов наблюдений РЛС в реальном режиме времени. Именно для оперативного прогноза работы РЛС представляется полезным применение метода восстановления профилей ПП с использованием измерений метеопараметров на БПЛА.

Укажем на преимущества применения БПЛА по сравнению с другими оперативными методами измерения показателя преломления. Расположение метеодатчиков на мачте корабля не позволяет измерить метеопараметры вне высоты мачты. Использование метеозондов — более затратная процедура по сравнению с БПЛА, т.к. зонд теряется безвозвратно. Кроме того, траектория зонда неуправляема. Применение метеодатчиков на вертолете из-за большой стоимости часа полета целесообразно лишь в качестве дополнительной нагрузки к основной задаче полета. Применение БПЛА представляется наименее затратным и оперативным способом измерения показателя преломления в нижних слоях тропосферы.

Методика восстановления профиля показателя преломления тропосферы по измерению метеопараметров с применением БПЛА

Для определения профиля ПП по метеопараметрам в тропосфере используется рекомендуемая МСЭ формула [7] для индекса преломления N

$$N = N_{dry} + N_{wet} = \frac{77,6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) \text{ N-единиц.} \quad (1)$$

При этом составляющая ПП N_{dry} , учитывающая сухой воздух, задается формулой

$$N_{dry} = \frac{77,6}{T} P, \quad (2)$$

а составляющая преломления радиоволн N_{wet} , учитывающая влажность — формулой

$$N_{wet} = 3,732 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad (3)$$

В (1)–(3) P — атмосферное давление (гПа), e — давление водяных паров (гПа), T — абсолютная температура (К). Формулы (1)–(3) справедливы в радиодиапазоне на частотах ниже 30 МГц [1]. Среднеквадратичная ошибка формул (1)–(3), обусловленная погрешностями эмпирических коэффициентов, входящих в эти формулы, не превышает 0,5% [1]. Вторым источником погрешности определения N являются ошибки измерения метеопараметров P, e, T .

Относительная влажность в процентах определяется формулой

$$h = \left(\frac{e}{e_0} \right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где e_0 — давление насыщенного пара. Модифицированный индекс преломления в форме, предложенной Паулусом и Ешке, определяется формулой

$$M(z) = M(0) + 0,13 \left[z - z_d \cdot \ln \frac{z + z_0}{z_0} \right], \quad (5)$$

В нее входят 4 параметра: $M(0) = (n-1) \cdot 10^6$ — модифицированный индекс преломления на уровне моря, z — высота над уровнем моря в метрах, z_d — высота волновода испарения в метрах, z_0 — аэродинамический параметр, для спокойной поверхности равный $1,5 \cdot 10^{-4}$ м.

В волноводе испарения основную роль играет градиент влажности в индексе показателя преломления. При нормальных условиях оценим, насколько должна измениться влажность на уровне моря, чтобы изменилась величина ΔN на 1 N-единицу. Получим $\Delta \varphi = 0,676\%$.

Для приповерхностного волновода основным фактором изменения N является инверсия температуры. При стандартной влажности 60% приращению $\Delta N = 1$ соответствует изменение температуры $\Delta T = \pm 1,2$ К.

В целом следует стремиться к тому, чтобы погрешности приборов позволяли измерять N с точностью до 1 N-единицы.

Для измерений метеопараметров был реализован специальный модуль, содержащий датчики метеопараметров P, T, h , блок питания и устройство памяти для записи данных во время полета. Для этих целей использовались интегрированные датчики окружающей среды BME280 разработки компании Bosch Sensortec GmbH (подразделение Bosch). Указанные сенсоры обеспечивают одновременное измерение температуры, давления и относительной влажности со следующими характеристиками:

- диапазон измерения относительной влажности — 0..100% с точностью $\pm 3\%$ (в диапазоне измерений 20..80% при температуре 25°C);
- диапазон измерения атмосферного давления — 300..1100 гПа с абсолютной погрешностью ± 1.0 гПа (при температуре 0..65°C);
- диапазон измерения температуры воздуха составляет $-40..+85^\circ\text{C}$ с абсолютной погрешностью $\pm 1.0^\circ\text{C}$ (в диапазоне 0..65°C) и не хуже ± 0.5 при температуре 25°C.

Приобретенные партии датчиков проверялись по величине разброса измеряемых параметров, датчики с большой погрешностью отбраковывались.

В качестве носителя модуля метеодатчика использовался БПЛА — квадрокоптер (КК) производства КНР со следующими данными:

- время полета — не более 23 мин;
- высота полета — до 150 м;
- скорость полета — до 7 м/с;
- максимальная скорость ветра, при которой разрешена эксплуатация КК — 7 м/с;

Максимальная дальность полета определяется допустимой скоростью и временем полета и составляет не более 5 км.

Квадрокоптер оборудован измерителем высоты с погрешностью измерения высоты 0,1 м, датчиками положения в пространстве систем GPS/ГЛОНАСС, видеокамерой.

В нашей стране развивается применение БПЛА для измерения метеопараметров [11], что открывает возможности определения ПП тропосферы. С практической точки зрения представляется важным измерение как вертикальных профилей ПП, так и горизонтальных профилей ПП. КК удобны для измерений вертикальных профилей. Достоинством КК является возможность измерения ПП на малых высотах, начиная от десятков сантиметров над морской поверхностью до 100 и более метров.

Измерение горизонтальных градиентов требует работы на больших дальностях вплоть до десятков и сотен километров за радиогоризонтом. Для таких измерений целесообразно использовать БПЛА самолетного типа.

Результаты измерений индекса преломления

Измерения метеопараметров с последующим восстановлением профиля ПП тропосферы проводились в береговой зоне Черного моря.

Два модуля с датчиками располагались на горизонтальной опоре, расположенной под КК. Во избежание влияния работы винтов КК на измерения метеопараметров модули датчиков были разнесены по горизонтали на расстояние ± 1 м от центра, так что они не попадали под ветровой поток, шедший от винтов КК.

Измерения проводились в мае, июле, сентябре сего года, ставили целью отработку методики измерений и не носили систематического характера. Первоначально предполагалось, что в течение каждого выбранного для измерений месяца сезона будет проведено измерение метеопараметров по высоте в три интервала времени суток: утром, в полдень и вечером. На практике число измерений было ограничено погодными и другими условиями. Результаты измерений в море относятся фактически к береговой линии. Приведем выборочные результаты измерений:

1. Измерения 04.05.2017, время — 07:21. Рис. 1–4. Графики P , T , h , модифицированный индекс преломления M (сплошная) и его аппроксимация профилем Паулуса–Ешке (штриховая линия). Все данные приведены для одного датчика.

2. Рис.5. Измерения 11.07.2017, время — 20:20. Модифицированные индексы преломления M для двух датчиков.

3. Рис.6. Измерения 20.09.2017, время — 13:42. Модифицированные индексы преломления M для двух датчиков.

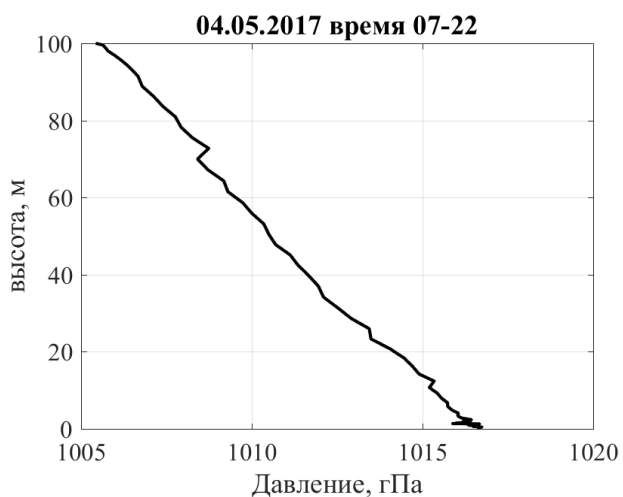


Рис. 1. Зависимость давления от высоты.

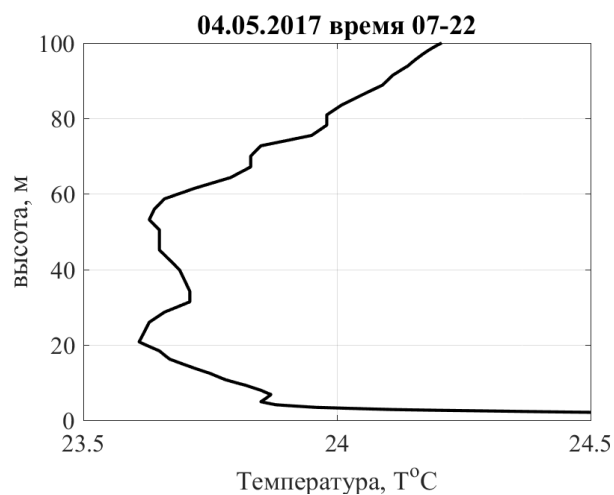


Рис. 2. Зависимость температуры от высоты.



Рис. 3. Зависимость влажности от высоты.

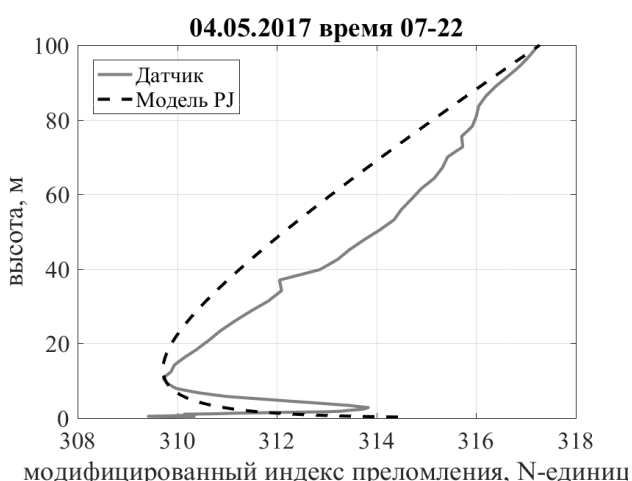


Рис. 4. Зависимость модифицированного индекса преломления от высоты.

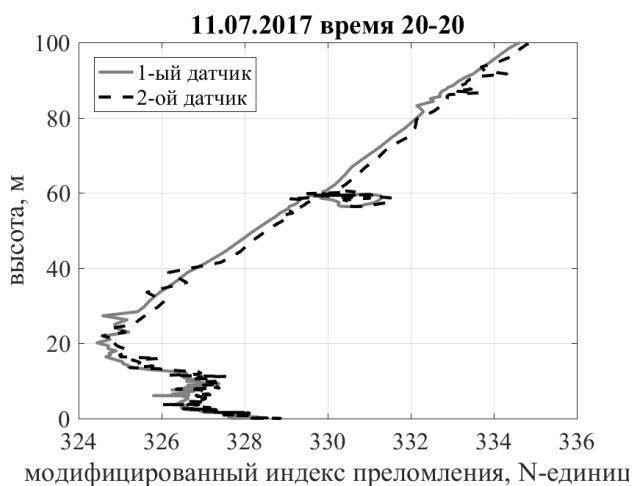


Рис. 5. Зависимость модифицированного индекса преломления от высоты.

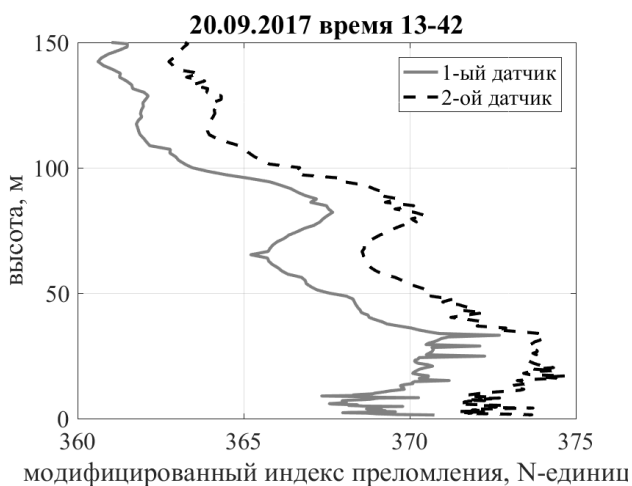


Рис. 6. Зависимость модифицированного индекса преломления от высоты.

С практической точки зрения важно определение областей модифицированного индекса преломления M с отрицательными градиентами, соответствующих волноводному механизму РРВ (см. (5)). На рис. 4 четко видна область отрицательных градиентов M в области существования ВИ (ниже 10 м). На рис. 5 видны две области отрицательных градиентов M , обе можно отнести к ВИ.

Удивительной представляется зависимость модифицированного индекса преломления от высоты, показанная на рис. 6. Наблюдается слоистая структура ПП с отрицательными градиентами M на высотах примерно 35–62 м, 80–110 м и 130–140 м.

Заключение

Первые эксперименты по применению БПЛА для определения показателя преломления нижней тропосферы по измерениям метеопараметров дали весьма обнадеживающие результаты. Предполагается продолжить эту работу в следующих направлениях:

- повышение точности измерений путем повышения качества калибровки датчиков;
- проведение серий измерений показателя преломления в море на больших дальностях от береговой линии;
- проведение серий измерений показателя преломления в различные сезоны и времена суток;
- прогнозирование работы РЛС на основе расчетов энергетического потенциала РЛС по методу параболического уравнения [12, 13] с использованием полученных экспериментально данных показателя преломления.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 8.3244.2017 / ПЧ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. –М.: Наука, 1976. 165 стр.
2. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. –М.: Наука, 1966.
3. Хитни Г.В. Распространение радиоволн в тропосфере. Обзор. [Текст] / Г.В. Хитни, Ю.Х. Рихтер, Р.А. Папперт, К.Р. Андерсон, Дж. Б. Баумгартнер-мл. // ТИИЭР. 1985. Т.73. №2. – с. 106–127.
4. Jeske, H., State and limits of prediction methods of radar wave propagation conditions over the sea / H. Jeske, edited by A. Zanca // Modern Topics in Microwave Propagation and Air-Sea Interaction. –D. Reidel, Norwell, Mass., 1973. – pp. 131–148.
5. Paulus R.A. Practical application of an evaporation duct model / R.A. Paulus // Radio Science. 1985. V. 20. № 4. – p. 887–896.
6. Weather Impacts Decision Aids (WIDA) Workshop. 15 March 2012, Reno, NV.
7. Рекомендация МСЭ-РР — 453-10 (02-2012) — Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции.
8. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. –М.; Наука, 1980.
9. Levy M. Parabolic equation methods for electromagnetic waves propagation.–London,UK,IEE. 2000
10. Valery A. Permyakov, Mikhail S. Mikhailov, Yekaterina A. Borodko Propagation of Radio Waves in the Presence of a Combined Tropospheric Duct / 2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS), Serbia, Niš, 18–20 October, 2017 Proceedings of Papers, pp.109–110.
11. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов для метеорологического и экологического мониторинга окружающей среды Н.М. Ситников, А.С. Азаров, И.И. Чекулаев, Д.В. Акмулин, В.И. Ситникова, А.А. Катюнин, А.Э. Улановский. / Беспилотная авиация — 2016, 3-я международная конференция. –М. 21–22 апреля 2016 г.
12. Пермяков В.А., Михайлов М.С., Махалов А.М. Ограничения дальности действия радиосистем в волноводе испарения / Известия высших учебных заведений. Физика, т. 59, №12–3, С. 140–144.
13. M. V. Isakov, A. M. Makhalov, M. S. Mikhailov, and V. A. Permyakov On the Effect of Refractive Index Perturbations on Propagation of Radio Waves in the Evaporation Duct // Progress In Electromagnetics Research Symposium, St. Petersburg, Russia, 22–25 May 2017.