

СЕКЦИЯ 2

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН МЕТРОВОГО СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ В ТРОПОСФЕРЕ И УРБАНИЗИРОВАННЫХ СРЕДАХ

ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ НА РАССЕЯНИЕ И ДИФРАКЦИЮ РАДИОВОЛН ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

В.Н. АБАРЫКОВ, А.С. БАТОРОЕВ

*Отдел физических проблем Бурятского научного центра СО РАН,
670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8, E-mail: borto@pres.bscnet.ru*

Приведены некоторые результаты исследований влияния подстилающей земной поверхности на формирование нижнего склона лепестка диаграммы излучения при малых углах скольжения падающей волны в диапазоне УКВ. Экспериментально определены модули эффективных коэффициентов отражения на ряде типовых радиотрасс с различными растительными покровами, в том числе дифракционных. Отмечены поляризационные зависимости величины коэффициента отражения на трассах с лесной растительностью.

V.N.ABARYKOV, A.S.BATOROEV

The results of researches of spreading terrestrial surface influence to formation of the bottom slope of the radiation diagramme are presented at small corners of incident wave at VHF range. Modules of effective refraction coefficients on a number of typical radio lines with a various vegetative cover, including diffraction lines are experimentally defined. Polarisng dependences refraction coefficients values on lines with wood vegetation are noted.

На приземных радиотрассах открытого и закрытого типов, проходящих вблизи линии радиогоризонта, во многих случаях характерны малые углы скольжения падающей радиоволны. В связи с этим представляет практический интерес исследование реальных характеристик рассеяния, поглощения и отражения радиоволн при скользящем падении лучей, определяющих условия формирования нижнего лепестка диаграммы антенны и условия дифракции радиоволн от вершин экранирующих горных препятствий в зависимости от рельефа подстилающей земной поверхности и ее растительного покрова. Экспериментальные измерения амплитудно-поляризационных характеристик уровней поля вблизи земной поверхности при скользящем падении радиоволн были проведены на ряде наиболее типичных радиотрасс с разными свойствами подстилающей поверхности в диапазоне метровых и дециметровых волн. Результаты измерений приведены в табл. 1. Методика исследований заключалась в следующем: при неизменной высоте приемной антенны записывались уровни принимаемых радиосигналов для определенных фиксированных высот передающей антенны, соответствовавших заданным углам скольжения лучей на площадках отражения. Как видно из табл. 1, на ровных безлесных трассах 1 и 3 уровни поля вблизи поверхности земли на обеих поляризациях поля были практически одинаковы. В дециметровом диапазоне относительно высокая растительность пшеничных посевов на трассе 3 обусловила большее ослабление поля по сравнению с трассой 1 независимо от поляризации. На пересеченной трассе 2 влияние земли в нижней части диаграммы антенны было незначительно на всех экспериментальных частотах без поляризационных различий. На трассах с лесной растительностью отмечались поляризационные различия в уровнях поля при малых углах скольжения в метровом радиодиапазоне: поле вертикальной поляризации над лесным покровом было ослаблено на 4÷6 дБ больше в сравнении с полем горизонтальной поляризации при равных условиях

распространения радиоволн. В дециметровом диапазоне поляризационных различий ослабления поля над лесистыми трассами практически не наблюдалось.

Эффекты зависимости ослабления поля от вида поляризации были выявлены также при распространении радиоволн непосредственно в лесной среде [1, 2]. Погонное ослабление поля вертикальной поляризации всегда превышало погонное ослабление поля горизонтальной поляризации. Так в смешанном лесу со средней плотностью деревьев среднесезонное погонное ослабление поля составило для частоты $f = 105$ МГц – 0,06 дБ/м при горизонтальной поляризации и 0,13 дБ/м при вертикальной поляризации излучения; для частоты $f = 330$ МГц – 0,1 дБ/м и 0,17 дБ/м соответственно. Эти явления поляризационной зависимости ослабления авторы объясняли поляризационными различиями электродинамических свойств лесной среды.

Таблица 1

№ тр.	Характер трассы	Угол скольжения, ψ°	Усредненный относительный уровень поля, дБ			
			$f = 88$ МГц		$f = 1000$ МГц	
			Гориз. поляр.	Вертик. поляр.	Гориз. поляр.	Вертик. поляр.
1	Ровное поле с невысокой травяной растительностью. Протяженность около 3 км	0,5	-20	-20	-5	-4
		1,0	-13	-12	-1	-1
		2,0	-6	-7	0	0
2	Средне-пересеченная холмистая с невысокой травой. Протяженность около 3 км.	0,5	-5	-6	-2,5	-1
		1,0	-2	-2	-3	-3
		2,0	-1	-0,5	-1,5	-3
3	Ровное пшеничное поле с высотой растений $\sim 30 \div 40$ см. Протяженность ~ 1 км.	0,5	-17	-20	-14	-13
		1,0	-14	-16	-10	-7
		2,0	-10	-11	0	-0,5
4	Слабопересеченная лесистая из хвойных деревьев средней плотности и высоты $\sim 8 \div 10$ м. Протяженность около 2 км.	0,5	-2	-9	-9	-9
		1,0	-2	-6	-3	-2
		2,0	-1	-2	-1	-2
5	Ровная лесистая с густым хвойным лесом высотой $\sim 10 \div 12$ м. Протяженность около 1 км.	0,5	-4	-9	-4	-2
		1,0	-4	-8	-2	-1
		2,0	-3	-7	-1	0

В приведенных в табл.1 экспериментальных данных имеет место иная ситуация: оцениваются относительные уровни поля над подстилающей поверхностью, влияние которой проявляется через рассеивающие и отражающие свойства. Здесь, по-видимому, проявляется коренное отличие вертикально поляризованных волн падающих под углами, близкими к углу Брюстера. Модуль коэффициента отражения при этом становится минимальным и поле над поверхностью подстилающей лесной среды определяется лишь величиной поля свободного пространства. Для волн горизонтальной поляризации при тех же скользящих углах падения лесная среда мало влияет на величину коэффициента отражения от поверхности земли из-за большей «прозрачности» [1] и поэтому суммарное поле в точке наблюдения над лесным пологом при благоприятных фазовых соотношениях оказывается выше уровня поля в свободном пространстве. Отсюда, можно предположить, что при малых углах падения радиоволн границы раздела отражающей среды для поля вертикальной и горизонтальной поляризации определяются высотой слоя лесного покрова. В отсутствие лесной растительности поверхность отражения для обеих поляризаций радиосигнала одна и та же и согласно электродинамической модели суммарное поле при горизонтальной поляризации испытывает большее ослабление по сравнению с вертикально поляризованным из-за противофазности прямого и отраженного лучей. Таким образом, эффективный коэффициент отражения характеризует поляризационные соотношения суммарного поля в реальных условиях приземных радиотрасс.

Некоторые результаты измерения эффективных коэффициентов отражения для ряда характерных участков земной поверхности были проведены по известной методике высотных разрезов интерференционной структуры поля, получаемой при изменении высот передающей

или приемной антенн в широком радиодиапазоне. Протяженность экспериментальных трасс выбиралась такой, чтобы при высотных разрезах поля зарегистрировать регулярные изменения уровня сигнала в пределах нижнего интерференционного лепестка пространственной диаграммы. Как правило, длина этих радиотрасс не превышала 1 км. Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Характеристика трасс в зонах отражения	Усредненные значения модуля коэффициента отражения $ \Phi $ и углов скольжения Ψ°									
		100 МГц		209 МГц		1000 МГц		1500 МГц		3000 МГц	
		г.п.	в.п.	г.п.	в.п.	г.п.	в.п.	г.п.	в.п.	г.п.	в.п.
1	Ровная, сухая почва, травяная растительность	0,8	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,8	0,7	0,7	0,8
		$\Psi=2^\circ$		$\Psi=3^\circ$		$\Psi=3^\circ$					
		$\Psi=7^\circ$		$\Psi=7^\circ$		0,7	0,5	0,8	0,4	-	
		$\Psi=5^\circ$		$\Psi=6^\circ$							
2	Холмистая, травяная растительность, кустарники	0,4	0,5	-	-	0,7	0,4	-	-	-	-
		$\Psi=4^\circ$		$\Psi=2^\circ$							
3	Ровная, лесная растительность, сплошной покров	0,7	0,2	0,6	0,3	0,7	0,4	-	-	-	-
		$\Psi=2^\circ$		$\Psi=2^\circ$							
		$\Psi=7^\circ$		$\Psi=7^\circ$		0,4	0,3				
		$\Psi=5^\circ$									
4	Холмистая, лес, поляны, кустарники	0,9	0,5	0,9	0,6	-	-	-	-	-	-
		$\Psi=9^\circ$		$\Psi=9^\circ$							

На дифракционных трассах влияние земной поверхности на поляризационные составляющие поля обусловлены, по крайней мере, тремя факторами: электродинамическими свойствами двух участков отражений, разделенных препятствием и прилегающих к антеннам передатчика и приемника, и свойствами поверхности экранирующей вершины препятствия, непосредственно формирующей область дифракции. Поляризационные эффекты с заметным различием в величине ослабления поля проявлялись на трассах с лесной растительностью [3] и для их оценки и учета необходимо было знать свойства подстилающей поверхности выраженные в значениях эффективных коэффициентов отражения $|\Phi|$. Полное экспериментально измеренное ослабление (dB) радиоволн любой поляризации относительно свободного пространства на дифракционных трассах определялось выражением:

$$W_n = V_d + M_1 + M_2, \quad (1)$$

где V_d – дифракционная составляющая ослабления, $M_{1,2}$ – интерференционные множители ослабления на участках трассы излучатель-препятствие, препятствие-приемник.

$$|M_{1,2}| = \sqrt{1 + \Phi_{1,2}^2 - 2\Phi_{1,2} \cos \delta_{1,2}}, \quad (2)$$

где $\delta_{1,2} = 2kh_{1,2} \sin \Psi_{1,2}$, $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина радиоволны, $h_{1,2}$ – высоты антенн передатчика и приемника, $\Psi_{1,2}$ – углы скольжения на участках дифракционных трасс.

Некоторые экспериментальные значения $|\Phi_1|$, $|\Phi_2|$ и V_d для ряда дифракционных трасс приведены в табл. 3. Приведенные в табл. 3 результаты для $|\Phi_{1,2}|$ согласуются с данными из табл. 2 и могут использоваться при типизации характеристик радиотрасс в прогнозных расчетах. Для дифракционной составляющей ослабления V_d поляризационные зависимости ограничиваются участком экранирующей вершины, который формирует область дифракции и соответственно дифракционное поле. Размеры этой области условно ограничены величиной первой зоны Френеля и в метровом радиодиапазоне составляют от десятков до сотен метров. Из табл. 3 хорошо видно влияние лесного покрова вершины препятствия на величину V_d : на

трассах 5-10 при вертикальной поляризации радиосигнала ослабление дифракционного поля было существенно больше, чем при горизонтальной. В то же время на трассах 1-4 с безлесной вершиной препятствия ослабление V_d практически не зависело от вида поляризации радиоволн.

Таблица 3

№ п/п	Длина трассы, км	Частота, МГц	Эффективные коэф. отражения						Экранирующая вершина		
			Φ_1			Φ_2			Поверхность вершины	V_d , dB	
			Площадка отраж. 1	г.п.	в.п.	Площадка отраж. 2	г.п.	в.п.		г.п.	в.п.
1	7,2	100	Неровная, трава, кустарник.	0,17	0,19	Неровная, перелески, кустарник.	0,21	0,3	Каменистая почва, трава, мелкий кустарник.	31	33
2	10,1	100		0,2	0,25		0,2	0,4		37	38
3	12,0	100	Неровная, мелколесье.	0,45	0,4	Открытая, болотистая, кустарник.	0,35	0,45		35	33
4	5,7	100		0,35	0,25		0,53	0,45		40	39
5	13,6	100	Неровная, кустарник.	0,3	0,4	Ровная, редкий лес.	0,9	0,8	Лес с хвойными и лиственными деревьями высотой 10-15 м.	30	33
6	8,4	100		0,15	0,1		0,9	0,8		36	38
7	9,1	100		0,3	0,11		0,5	0,2		32	36
8	9,2	100 209	Закрытая рельефом зона отражения.	-	-	Невысокий сплошной лес, мелкие неровности.	1	0,35		50	56
				-	-		1	0,65		66	72
9	8,9	100 209		-	-		0,8	0,25		47	52
				-	-		0,6	0,3		65	74
10	3,3	100 209	-	-	0,6	0,2	41	48			
			-	-	0,55	0,22	54	66			

Дифракционные трассы с одним экранирующим препятствием, вершина которого относительно ровная и покрыта почти однородным лесным пологом, могут быть рассчитаны по дифракционной модели [3] с учетом поляризационных особенностей. При этом вероятный модуль коэффициента отражения для такого лесного слоя может быть заимствован из данных, приведенных выше, для типовых радиотрасс. Таким же образом может быть решена и обратная задача: по измеренным значениям дифракционного ослабления для разных видов поляризации радиосигналов и их взаимному соотношению определить вероятные электрические параметры леса на вершине препятствия. Для препятствий с изрезанной неровной вершиной и протяженной в продольном направлении трассы учитываемые лесные участки в модели [3] должны располагаться только в «освещенной» области вершины со стороны передатчика и приемника. В средней части такой экранирующей вершины из-за малого поворота дифракционного луча поляризационные эффекты практически незаметны. Такая же ситуация складывается для многовершинных трасс, когда срединные препятствия не оказывают влияния на тип поляризации радиосигналов, а наблюдаемые поляризационные различия определяются лишь плотностью лесного покрова «освещенных» поверхностей крайних экранирующих вершин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доржиев Б.Ч., Плетнев В.И., Хомяк Е.М. Погонное ослабление метровых волн, распространяющихся в лесной среде. // Распространение электромагнитных волн. Улан-Удэ, БФ СО АН СССР, 1987, с.87.
2. Магазинникова А.Л., Якубов И.П. Дуальный механизм распространения радиоволн в условиях леса. // Радиотехника и электроника, 1999, том 44, №1, с.5-9.
3. Абарыков В.Н., Батороев А.С. Поляризационные особенности дифракционного поля УКВ на горных радиотрассах. // ГИАБ, 2005, №12, с.114-117.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ УКВ С УЧЁТОМ ОТРАЖЁННЫХ ОТ УКЛОНОВ МЕСТНОСТИ РАДИОВОЛН

А.И. АГАРЫШЕВ, К.Н. БАБЕНКОВ, А.Г. ЗВЕРЕВ

*НИ Иркутский государственный технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
E-mail: reirem@istu.edu, aai.irk@mail.ru*

Приведены результаты измерений напряжённостей поля УКВ, полученные в условиях уменьшения высот рельефа местности с увеличением дальностей от радиопередатчика. Отмечено наличие интервала дальностей, для которого наблюдалось существенное уменьшение напряжённости поля, после чего наблюдалось увеличение этой напряжённости с ростом удаления от передатчика. Выполнен анализ условий формирования поля УКВ с использованием простой модели рельефа местности.

FEATURES OF FORMATION OF THE FIELD OF VHF IN VIEW OF REFLECTED FROM BIASES OF DISTRICT OF RADIOWAVES

A.I. AGARISHEV, K.N. BABENKOV, A.G. ZVEREV

Results of measurements of intensity of a VHF field, received in conditions of reduction of heights of a lay of land with increase of distances from a radio-transmitter are present. Presence of an interval of distances for which essential reduction of intensity of a field then the increase in this intensity with growth of removal from the transmitter was observed is note. Done and presented the analysis of a formation conditions of a VHF field with use of simple model of a lay of land.

Введение

Радиоволны УКВ-диапазона (рабочие частоты 30-300 МГц) широко используют для радиосвязи и радионавигации на дальностях прямой видимости. Для проектирования соответствующих систем и устройств необходимо рассчитывать напряжённости поля УКВ в заданных пунктах местности. Такие задачи решают в условиях различного рельефа местности, который существенно влияет на результаты расчётов. Представляет интерес анализ условий, соответствующих максимальному увеличению напряжённости поля УКВ по сравнению с ровной местностью, а также условий, в которых происходит существенное уменьшение этой напряжённости.

Известно, что поле УКВ над ровной поверхностью Земли формируется в результате суммирования полей прямой и отражённой от поверхности Земли радиоволн [1]. Известно также [1], что суммарное поле УКВ в этих условиях существенно меньше, чем поле прямой распространяющейся в свободном пространстве волны, напряжённость поля которой убывает в зависимости от расстояния r между приёмной и передающей антеннами как $\sim 1/r$, в то время как суммарная напряжённость поля двух волн убывает как $\sim 1/r^2$. Убывание напряжённости поля УКВ E как $\sim 1/r^2$ отражает известная квадратичная формула Введенского [1].

Однако результаты измерений зависимости $E(r)$, полученные нами для рабочей частоты $f=130$ МГц в типичных условиях слабо выраженного рельефа местности, показали существенные отличия от известных закономерностей изменений напряжённостей поля УКВ при изменении удаления от радиопередатчика. Наблюдался, в частности, рост значений E при увеличении этих удалений, когда максимальные значения E соответствовали затуханию поля в свободном пространстве. Такой рост наблюдался после убывания E , более быстрого, чем по закону $\sim 1/r^2$.

Цель работы

Интерпретация результатов измерений напряжённостей поля УКВ для модели рельефа местности из двух горизонтальных участков, разделённых склоном, и обоснование значений

дальностей от радиопередатчиков, для которых возможны существенные отличия этих напряжённостей от рассчитанных для ровной местности.

Результаты и условия измерений зависимости напряжённостей поля от дальности

На рис. 1 приведена зависимость напряжений на входе радиоприёмника от дальности, измеренная в окрестности аэропорта г. Иркутск, когда изменения высот местности при удалении от радиопередатчика можно аппроксимировать моделью, показанной на рис. 2. Для излучения радиоволн применялся передатчик типа Баклан-РН выходной мощностью 5Вт и передающая антенна типа АНК/100-150 с высотой подвеса $h_1 = 32$ м, вертикальной поляризацией и круговой ДН по азимуту. Напряжения на входе приёмника измерялись селективным микровольтметром типа SMV8.5, к которому подключалась антенна типа АШС-1 с высотой подвеса $h_2 = 3$ м.

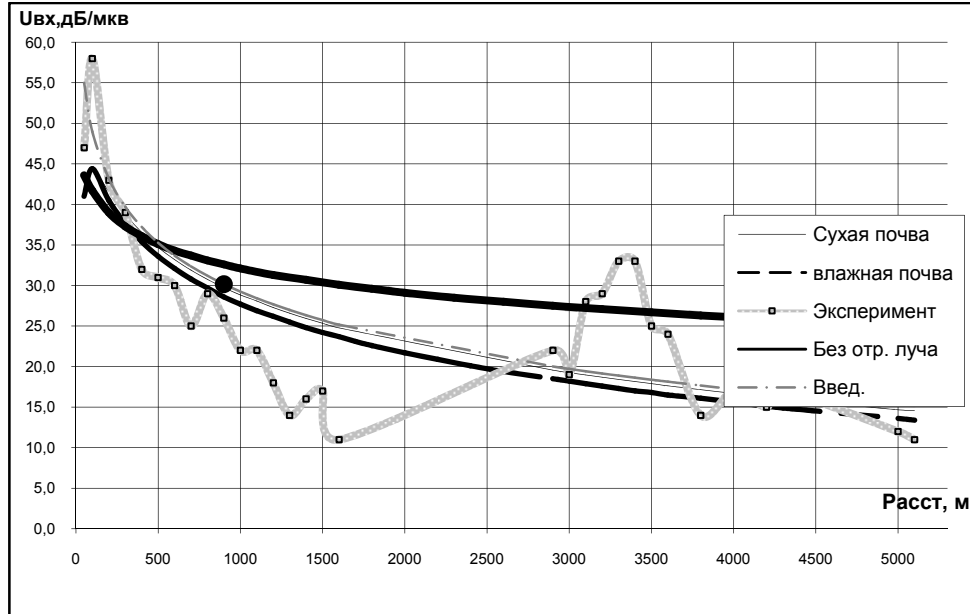


Рис.1. Измеренные (\square) и рассчитанные (4 кривые) зависимости напряжений на входе приёмника ($U_{вх}$) от расстояний между передающей и приёмными антеннами (м)

Отметим, что значения $U_{вх}$ связаны с напряжённостью поля E через известный коэффициент, зависящий от параметров приёмного антенно-фидерного тракта [2]. Представленная в работе [3] программа позволяет на основе двухлучевой модели формирования поля УКВ [1] и параметров приёмо-передающей аппаратуры рассчитывать напряжения на входе приёмников $U_{вх}$.

Результаты расчётов по программе [3] приведены на рис. 1 без учёта рельефа местности, где толстая сплошная линия соответствует затуханию радиоволн в свободном пространстве, более тонкая чёрная линия – расчётам по известной формуле Введенского [1], тонкие линии получены в результате суммирования прямого луча, приходящего к приёмной антенне по кратчайшему пути, и отражённого от поверхности Земли луча. Суммирование выполнено с учётом фаз лучей и коэффициентов отражения радиоволн от поверхности Земли для разных почв [1].

Отметим, что для расстояний левее чёрной точки на рис.1 формулу Введенского согласно рекомендациям [1] применять нецелесообразно даже для ровной местности. Тем не менее, для этих расстояний результаты расчётов E удовлетворительно согласуются с результатами измерений всеми рассмотренными методами. При этом расстояние $4h_1 h_2/\lambda$ согласно [1] примерно соответствует последнему интерференционному максимуму поля. После этого максимума напряжённости поля E должны монотонно убывать с ростом удалений от передатчика r .

Согласно рис. 1 измеренные значения E для $r > 1$ км падают быстрее расчётных, особенно резко для $r > 1,5$ км, когда до $r \approx 2,9$ км приём отсутствовал, после чего наблюдался существенный рост измеренных E , когда для $r \approx 3,3$ км значения E были больше расчётных для свободного пространства. Затем опять наблюдалось резкое уменьшение E , но для $r > 3,7$ км

результаты измерений E опять были близки к расчётным значениям. Для интерпретации результатов выполненного эксперимента используем показанную на рис. 2 модель рельефа местности.

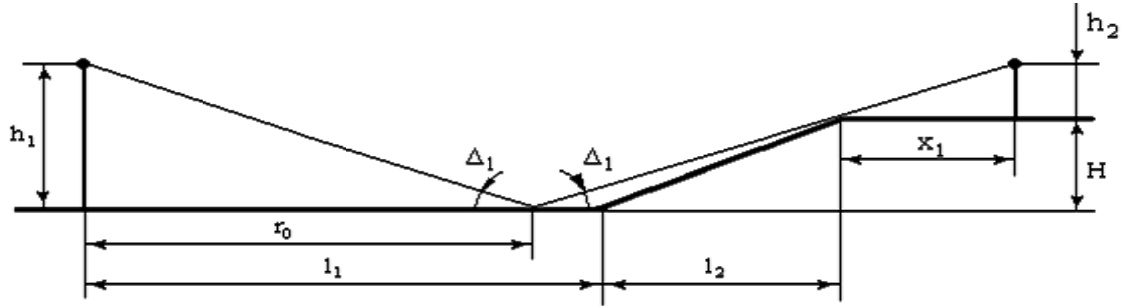


Рис.2. Модель, аппроксимирующая профиль местности для условий эксперимента

Для условий рис. 1 характерны следующие параметры модели рис. 2: $H=34$ м – высота склона, $x_1=1500$ м – длина верхнего плоского участка, $l_2=1800$ м – длина склона.

Расчётные соотношения для условий формирования поля

На первом этапе анализа экспериментальных данных используем метод геометрической оптики (ГО). Для модели рельефа местности, показанной на рис.1, сформулируем условие прямой видимости передающей и приёмной антенн для всех дальностей:

$$h_2/x_1 > (H - h_1) / l_2 \quad (1)$$

Для набора параметров 1, приведённых ниже рис. 2, условие (1) показывает приём прямого луча для дальностей $r < 5,2$ км, соответствующих экспериментальным данным рис. 1. Отметим, что сферичность Земли согласно [3] можно учесть введением отрицательной поправки к высоте передающей антенны h_2 , однако эта поправка для $r < 4$ км не превышает -1 м.

Для других параметров модели рис. 2 невыполнение соотношения 1 означает отсутствие приёма прямого луча на склоне, начиная с дальностей:

$$r_{оп} = x_1 (1 + h_1 / h_2), \quad (2)$$

что возможно, например, для следующих параметров модели рис. 2: $H=36$ м, $l_2=1670$ м, $x_1=1630$ м. Эти параметры (параметры 2) отличаются от параметров 1 в пределах допустимой погрешности аппроксимации реального рельефа местности. Поэтому для интерпретации результатов измерений $E(r)$, приведённых на рис. 1, рассмотрим ситуацию, как с приёмом прямого луча, так и отсутствием такого приёма на участке дальностей, границы которого можно рассчитать из чисто геометрических соображений. Из (2) для параметров (2) получим значение $r_{оп} = 1783$ м для нижней границы этого участка, что превышает дальность прекращения приёма согласно результатам, приведённым на рис. 1.

Выражение для дальности $r_{п}$, начиная с которой появляется приём прямого луча на нижнем горизонтальном участке модели рис. 2 при отсутствии приёма этого луча на склоне, имеет вид:

$$r_{п} = (h_2 + H - h_1) x_1 / h_2. \quad (3)$$

Для набора параметров 2 рассчитанное из (3) значение $r_{п} = 3311$ м, что соответствует локальному максимуму зависимости $E(r)$ на рис.1. Из выражения (3) следует выражение для расстояния до точки отражения луча $r_{от}$ на нижнем горизонтальном участке модели рис. 2:

$$r_{от} = (h_2 + H) x_1 / h_2, \quad (4)$$

что для набора параметров 2 даёт значение $r_{от} = 3464$ м. Тогда для определения дальности приёма отражённого луча к этому значению надо прибавить дальность от точки отражения до приёмной антенны, что даёт выражение для начальной дальности приёма радиоволны, отражённой нижним горизонтальным участком модели рис. 2:

$$r_{пот} = (h_2 + H + h_1) x_1 / h_2. \quad (5)$$

Для набора параметров 2 получим $r_{пот} = 3617$ м, что на рис. 1 соответствует середине участка с уменьшением напряжённостей поля от локального максимума зависимости $E(r)$ до значений, соответствующих расчётной сумме прямого и отражённого лучей. Поэтому уменьшение значений E для $r > r_{п} = 3311$ м, наблюдаемое на рис. 1, можно объяснить появлением отражённой волны, фаза которой отличается почти на 180° от прямой волны, что

уменьшает напряжённость поля суммарной радиоволны в соответствии с известными результатами [1].

Важное значение для интерпретации результатов измерений зависимостей $E(r)$, приведённых на рис.1, имеют оценки радиусов первой зоны Френеля b_1 для различных ситуаций с экранированием приёма прямого луча для модели рис.2, что необходимо для оценки влияния дифракционных эффектов при формировании поля. Согласно выражениям из работы [1] для рассчитанного выше значения $r_{0П}=1783$ м на дальности x_1 $b_1=18$ м, т.е. эти эффекты необходимо учитывать при более строгих расчётах напряжённостей поля для рассматриваемой модели.

Применение теории дифракции радиоволн на клине согласно работе [1] даёт уменьшение напряжённости поля по сравнению с распространением в свободном пространстве на $\approx 6,5$ дБ, т.е. в $\approx 4,5$ раза, что уменьшит рассчитанное методом ГО значение $r_{0П}$ и улучшит согласие с данными рис. 1. Однако уменьшение значений E , как и $U_{ВХ}$, на 6,5 дБ должно наблюдаться и для $r_{П}=3311$ м, что не позволяет объяснить превышение измеренных значений E в окрестности этого значения $r_{П}$ над значениями E , рассчитанными для свободного пространства.

Поэтому вернёмся к набору параметров 1, когда прямой луч наблюдается для всего диапазона дальностей, и рассмотрим возможности изменений значений $E(r)$ для суммарной радиоволны, что возможно в результате экранирования отражённого от поверхности Земли луча.

Условие существования луча, отражённого на склоне модели рельефа рис. 2, имеет вид:

$$h_2/x_1 > H/l_2 \quad (6)$$

и выполнено для параметров 1, когда приём этого луча на высоте h_1 начинается с дальностей:

$$r_{0С} = x_1 + h_1 / (h_2/x_1 - H/l_2), \quad (7)$$

что для набора параметров 1 даёт значение $r_{0С}=2777$ м. Отметим, что формулы (1-11) получены при замене синусов малых углов на их аргументы, а косинусов этих углов на 1.

Приём луча, отражённого верхним участком модели рис.1, отсутствует для дальностей:

$$r > r_{0В} = x_1 + h_1 / (h_2/x_1 + H/l_2), \quad (8)$$

что для параметров 1 даёт значение $r_{0В}=1575$ м. Отметим, что отсутствие отражённых склоном лучей в диапазоне дальностей от $r_{0В}$ до $r_{0С}$ в выполненных расчётах обусловлено неполнотой использованной модели рельефа местности, т.е. резкими переходами от горизонтальных участков местности к склону. На самом деле отражённые склоном лучи могут существенно ослаблять суммарное поле, так как фазовые пути прямого и отражённого от склона лучей отличаются меньше, чем пути прямого и отражённого горизонтальным участком местности лучей. Отражённые от склона под более низкими углами лучи приобретают дополнительные набеги фаз относительно прямых лучей почти на 180° . Поэтому сумма прямого и отражённого от склона луча существенно меньше, чем эта сумма для отражённого от ровной местности луча.

С учётом замечания, сделанного в предыдущем абзаце, можно объяснить приведённые на рис. 1 результаты измерений зависимости $E(r)$ в диапазоне $r > r_{0В}=1575$ м, когда наблюдалось существенное уменьшение напряжённости поля. Существенного увеличения этой напряжённости следует ожидать при появлении луча с двумя точками отражения, одна из которых находится на склоне, а вторая - на нижнем горизонтальном участке модели рис. 2. Такой луч, приобретая при каждом отражении сдвиги по фазе на 180° , окажется почти в фазе с прямым лучом.

Учтём также третий луч, который отражается от нижнего горизонтального участка модели рис. 2. Дальность начала приёма такого луча находится из очевидной формулы:

$$r_{0Н} = x_1 + l_2 + h_1 x_1 / h_2, \quad (9)$$

что для параметров 1 даёт значение $r_{0Н}=3441$ м. Такое значение близко к значению, для которого наблюдается максимум экспериментальной зависимости $E(r)$ на рис.1, но с этой дальности начинается уменьшение значений E .

Представляет интерес оценка интервала дальностей, в который попадает луч с двумя отражениями от поверхности Земли. Нижнюю границу этого интервала $r_{02Н}$ получим для двух близких точек отражения, одна из которых находится вблизи нижней части склона, что даёт:

$$r_{02Н} = x_1 + l_2 + h_1 / [H/l_2 - h_2/x_1 + (H + h_2)/(x_1 + l_2)], \quad (10)$$

что для параметров 1 даёт значение $r_{O2H}=3471$ м. Верхнюю границу дальности приёма луча с двумя отражениями от поверхности Земли r_{O2B} получим для двух более удалённых точек отражения, одна из которых находится на верхнем участке склона, что даёт:

$$r_{O2B} = x_1 + (H + h_1) / (2H / l_2 - h_2 / x_1), \quad (11)$$

что для параметров 1 даёт $r_{O2B}=3750$ м, когда согласно рис.1 выброс $E(r)$ заканчивается.

Таким образом, лучи, отражённые от склона длиной 1800 м, после отражения от нижнего горизонтального участка модели рельефа, показанной на рис. 2, фокусируются в более узкий интервал дальностей $r_{O2B} - r_{O2H} = 279$ м, что и является основной причиной увеличения напряжённости поля по сравнению с полем в свободном пространстве, что показывает рис.1. Такая фокусировка может обеспечить превышение суммарной напряжённости поля над результатами расчётов для одного прямого луча даже при учёте дифракционных эффектов. Появление третьего луча с одним отражением приводит к ослаблению поля до расчётных значений.

Выводы

Анализ результатов измерений, выполненный в приближении геометрической оптики, позволил дать качественную интерпретацию результатов измерений на рис.1, уточнение которой для модели рис. 2 возможно при учёте дифракционных эффектов формирования поля УКВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн.- М.: Связь. – 1972.- 336 с.
2. Дрaбкин А.Л. и др. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов.Радио. – 1974. -536 с.
3. Агарышев А.И., Зверев А.Г., Краснояров А.Е. Анализ измеренных и рассчитанных напряжённостей поля радиоволн с целью оптимизации положения приёмного пункта системы радиосвязи с самолётами//Современные проблемы радиоэлектроники и связи: Материалы VI Межвуз. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых.– Иркутск: ИрГТУ, 2007.– С.14-25.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ РАСЧЁТА НАПРЯЖЁННОСТЕЙ ПОЛЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИГНАЛОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

А.И. АГАРЫШЕВ, В.Л. КУКЛИН

*НИ Иркутский государственный технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
E-mail: reirem@istu.edu, aai.irk@mail.ru*

Предлагается алгоритм расчёта напряжённости поля радиоволн УКВ диапазона, основанный на двухлучевой модели формирования поля. Приведены результаты сравнения измеренных и рассчитанных напряжённости поля на расстояниях до 36 км от телецентра для разных телевизионных каналов. Выполнен анализ этих результатов для различных ситуаций. Показана более высокая точность расчётов по сравнению с известной формулой Введенского.

ESTIMATION OF ACCURACY OF METHODS OF CALCULATION OF INTENSITY OF THE FIELD TELEVISION SIGNALS ON EXPERIMENTAL DATA

A.I. AGARISHEV, V.L. KUKLIN

The algorithm of calculation of intensity of a field of VHF radio waves, based on two-ray model of field formation is offer. Results of comparison measured and calculated intensity fields for distance to 36 km from a television center for different television channels are present. The analysis of measurements is completed for different situations. Higher accuracy of calculations of comparison with formula of Vvedensky's is show.

Введение

При проектировании радиотехнических систем, использующих диапазон ультракоротких волн (УКВ) длиной $\lambda = 1-10$ м для радиосвязи и телевидения, необходимы расчёт напряжённости поля УКВ (E). С этой целью широко используют приближённую формулу Введенского, которая следует из двухлучевой модели формирования поля УКВ [1]. Согласно этой модели значения E рассчитывают как результат интерференции прямого и отражённого от Земли лучей с учётом их амплитуд и фаз. При этом необходимы аналитические выражения для модулей R_θ , R_ζ и фаз φ_θ , φ_ζ комплексных коэффициентов отражения УКВ от поверхности Земли при вертикальной и горизонтальной поляризации поля радиоволны. Эти выражения приведены в докладе с учётом углов отражения γ (рис.1), проводимости σ и диэлектрической проницаемости ε почвы.

Цель доклада - разработка вопросов применения двухлучевой модели формирования поля УКВ и анализ точности расчётов напряжённости поля УКВ с использованием этой модели и формулы Введенского по результатам измерений уровней телевизионных радиосигналов.

Алгоритм и программа расчётов напряжённости поля УКВ для двухлучевой модели

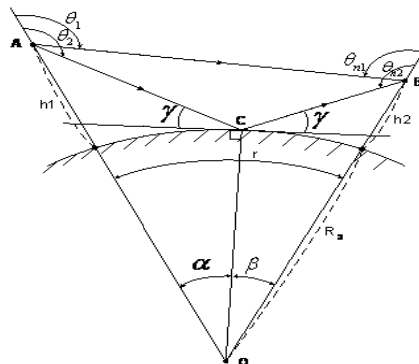


Рис. 1. Формирование поля при сложении прямого АВ и отражённого от поверхности Земли АСВ лучей

Выражения для комплексных коэффициентов отражения радиоволн вертикальной и горизонтальной поляризации имеют вид [2]:

$$\dot{R}_\theta = \frac{\varepsilon_\kappa \sin \gamma - \sqrt{\varepsilon_\kappa - \cos^2 \gamma}}{\varepsilon_\kappa \sin \gamma + \sqrt{\varepsilon_\kappa - \cos^2 \gamma}}, \quad \dot{R}_\varrho = \frac{\sin \gamma - \sqrt{\varepsilon_\kappa - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{\varepsilon_\kappa - \cos^2 \gamma}},$$

где $\varepsilon_\kappa = \varepsilon - j60\lambda\sigma$. Определять модули R_θ, R_ϱ и аргументы $\varphi_\theta, \varphi_\varrho$ этих коэффициентов можно по известным графикам Берроуза [1], но использовать эти графики для больших объёмов расчётов крайне неудобно. Поэтому представляют интерес аналитические выражения для R_θ, R_ϱ и $\varphi_\theta, \varphi_\varrho$. Для удобства получения этих выражений обозначим $A = \varepsilon - \cos^2 \gamma$, $B = -60\lambda\sigma$. Тогда:

$$\sqrt{\varepsilon - j \cdot 60 \cdot \lambda \cdot \sigma - \cos^2 \gamma} = \sqrt{A^2 + B^2} \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}} = |C| \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}}, \quad |C| = \sqrt{A^2 + B^2} \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{B}{A}$$

$$R_\theta = \frac{\varepsilon + jB - \frac{\sqrt{|C|}}{\sin \gamma} \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}}}{\varepsilon + jB + \frac{\sqrt{|C|}}{\sin \gamma} \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}}} = \left\{ \frac{\sqrt{|C|}}{\sin \gamma} = C_1 \right\} = \frac{\varepsilon - C_1 \cos \frac{\varphi}{2} + j(B - C_1 \sin \frac{\varphi}{2})}{\varepsilon + C_1 \cos \frac{\varphi}{2} + j(B + C_1 \sin \frac{\varphi}{2})} = \left| \frac{R_{1\theta}}{R_{2\theta}} \right| e^{j\varphi_\theta}$$

$$|R_{1\theta}| = \sqrt{\left(\varepsilon - C_1 \cos \frac{\varphi}{2}\right)^2 + \left(B - C_1 \sin \frac{\varphi}{2}\right)^2}, \quad |R_{2\theta}| = \sqrt{\left(\varepsilon + C_1 \cos \frac{\varphi}{2}\right)^2 + \left(B + C_1 \sin \frac{\varphi}{2}\right)^2}$$

$$\varphi_\theta = \operatorname{arctg} \frac{B - C_1 \sin \frac{\varphi}{2}}{\varepsilon - C_1 \cos \frac{\varphi}{2}} - \operatorname{arctg} \frac{B + C_1 \sin \frac{\varphi}{2}}{\varepsilon + C_1 \cos \frac{\varphi}{2}}.$$

$$R_\varrho = \frac{\sin \gamma - \sqrt{C} e^{j\frac{\varphi}{2}}}{\sin \gamma + \sqrt{C} e^{j\frac{\varphi}{2}}} = \frac{\sin \gamma - \sqrt{C} \cos \frac{\varphi}{2} - j\sqrt{C} \sin \frac{\varphi}{2}}{\sin \gamma + \sqrt{C} \cos \frac{\varphi}{2} + j\sqrt{C} \sin \frac{\varphi}{2}} = \left\{ \begin{array}{l} a_1 = \sqrt{C} \cos \frac{\varphi}{2} \\ b_1 = \sqrt{C} \sin \frac{\varphi}{2} \end{array} \right\} =$$

$$= \frac{\sin \gamma - a_1 - jb_1}{\sin \gamma + a_1 + jb_1} = \left| \frac{R_{1\varrho}}{R_{2\varrho}} \right| e^{j\varphi_\varrho},$$

$$R_{1\varrho} = \sqrt{(\sin \gamma - a_1)^2 + b_1^2} \cdot e^{-j \cdot \operatorname{arctg} \frac{b_1}{\sin \gamma - a_1}}, \quad R_{2\varrho} = \sqrt{(\sin \gamma + a_1)^2 + b_1^2} \cdot e^{j \cdot \operatorname{arctg} \frac{b_1}{\sin \gamma + a_1}}$$

$$|R_\varrho| = \sqrt{\frac{(\sin \gamma - a_1)^2 + b_1^2}{(\sin \gamma + a_1)^2 + b_1^2}}, \quad \varphi_\varrho = -\operatorname{arctg} \frac{b_1}{\sin \gamma - a_1} - \operatorname{arctg} \frac{b_1}{\sin \gamma + a_1}$$

Затем рассчитанные значения R_θ, R_ϱ и $\varphi_\theta, \varphi_\varrho$ используются в расчётах модулей напряжённостей поля УКВ в соответствии с выражениями из работы [1], но при учёте сферичности Земли на основе разработанного итерационного алгоритма расчёта угла отражения γ .

Разработанный алгоритм расчёта напряжённости поля УКВ реализован в среде программирования Delphi 7. В окне ввода данных, представленном в работе [3], задаются мощность передатчика, высоты передающей и приёмной антенн, коэффициент направленного действия передающей антенны, коэффициент затухания волны в фидере между передатчиком и антенной, длина фидера, коэффициент бегущей волны в фидере, диэлектрическая проницаемость ε и проводимость σ почвы в окрестности передатчика. Можно ввести также эффективные значения радиусов Земли, что согласно [1] в первом приближении позволит учесть преломление УКВ в тропосфере.

Программа рассчитывает геометрические параметры прямого и отражённого лучей в соответствии с рис. 1, т.е. дальности прямого и отражённого лучей, их угловые характеристики, необходимые для учёта диаграмм направленности передающей и приёмной антенн, модули и фазы коэффициентов отражения для вертикальной и горизонтальной

излучаемых радиоволн, модули и фазы напряжённости полей для прямых и отражённых лучей, модуль напряжённости поля суммы этих лучей с учётом их фаз, напряжённость поля по формуле Введенского.

Анализ результатов измерений и расчетов

Методики измерений напряженностей поля УКВ, выполненных в окрестности Иркутского областного радиотелепередающего центра (ИОРТПЦ), изложены в работе [4], где приведены также исходные данные для расчётов этих напряжённостей. Измерения велись на разных расстояниях от ИОРТПЦ для рабочих частот f передатчиков 1,3,5,11 телевизионных каналов.

При расчётах мощности радиопередатчиков умножались на коэффициент 0.327, учитывающий уменьшение мощности излучения реального сигнала по сравнению с мощностью, которая реализуется для экрана телевизора чёрного цвета. Расчёты выполнялись для полей горизонтальной поляризации, излучаемых типовыми телевизионными антеннами. Высоты приёмной антенны h_2 задавались по топографическим картам. Задавались значения ϵ и σ для средневлажной почвы [1]. Пример сравнения результатов измерений и расчетов напряжённостей поля УКВ с учётом (курсив) и без учёта этих высот даёт таблица 1, откуда видно, что напряжённости поля УКВ, рассчитанные по двухлучевой модели рис.1, меньше рассчитанных по формуле Введенского и ближе к результатам измерений.

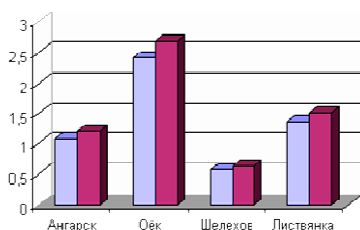
Уменьшение E_z для канала 11 с более высокой рабочей частотой по сравнению с каналами 1,3 можно объяснить увеличением поглощения УКВ в зданиях, растительности, а также более сильным затуханием при дифракции волн на неоднородностях рельефа.

Таблица 1 показывает также, что задание высот приёмной антенны с помощью топографической карты позволяет в большинстве ситуаций улучшить соответствие расчётных и экспериментальных напряженностей поля УКВ на удалении 8 км от ИОРТПЦ.

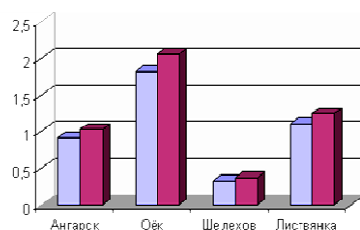
Таблица 1. Рассчитанные по формуле Введенского (E_v), двухлучевой модели (E) напряжённости поля и результаты измерений E_z для дальности 8 км

Канал	f , Мгц	Направления от Иркутска	E_v , мВ/м	E_z , мВ/м	E , мВ/м	E_z/E_v	E_z/E
1	48.5	Ангарск	14,6/14,6	14,0	13,1/13,1	0,95/0,95	1,07/1,07
		Оёк	14,6/21,9	14,0	13,1/19,1	0,95/0,64	1,07/0,73
		Шелехов	14,6/14,6	10,2	13,1/13,1	0,69/0,69	0,78/0,78
		Листвянка	14,6/21,9	17,6	13,1/19,1	1,20/0,81	1,34/0,92
3	88	Ангарск	44,2/44,2	72,4	38,9/38,9	1,64/1,64	1,86/1,86
		Оёк	44,2/66,3	32,4	38,9/56,3	0,73/0,48	0,83/0,58
		Шелехов	44,2/44,2	50,1	38,9/38,9	1,13/1,13	1,29/1,29
		Листвянка	44,2/66,3	27,2	38,9/56,3	0,62/0,41	0,69/0,48
11	217	Ангарск	50,4/42,6	10,5	38,4/34,4	0,21/0,25	0,27/0,30
		Оёк	50,4/63,9	56,2	38,4/44,1	0,11/0,08	0,15/0,13
		Шелехов	50,4/42,6	12,8	38,4/34,4	0,25/0,31	0,33/0,37
		Листвянка	50,4/63,9	19,72	38,4/44,1	0,39/0,31	0,51/0,45

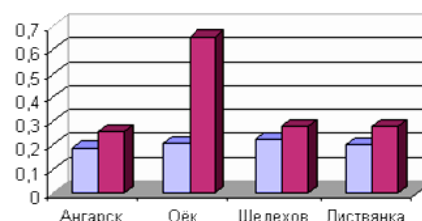
Отношения измеренных напряжённостей поля к рассчитанным по формуле Введенского (светлые столбцы) и по двухлучевой модели (тёмные столбцы) для удалений 12,24,36 км от ИОРТПЦ приведены на рис. 2-4, где а) соответствует каналу 1, б) – каналу 3, в) – каналу 11.



а)



б)



в)

Рис. 2. Отношения измеренных и рассчитанных напряжённостей поля для расстояния 12 км

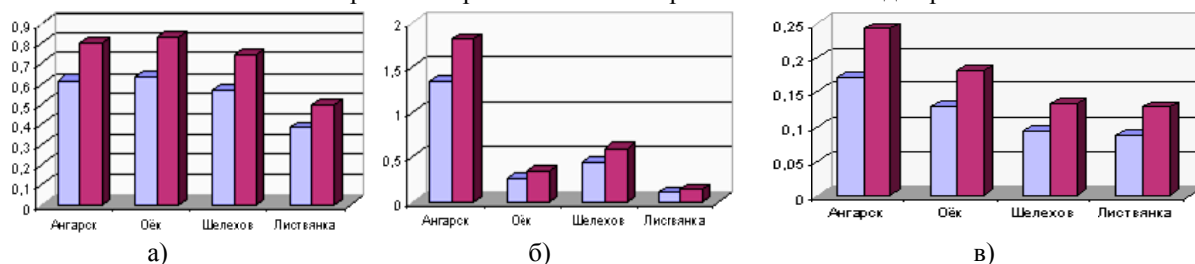


Рис. 3. Отношения измеренных и рассчитанных напряжённостей поля для расстояния 24 км

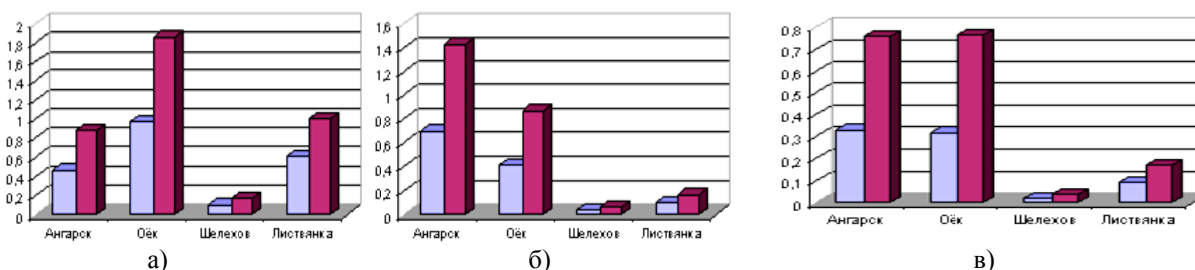


Рис. 4. Отношения измеренных и рассчитанных напряжённостей поля для расстояния 36 км

Анализ рис. 2-4 подтверждает сделанные выше выводы о более высокой точности двухлучевой модели поля УКВ по сравнению с формулой Введенского. Отметим превышение измеренных E_z над рассчитанными на рис.3а,б для Оёка, что можно объяснить экранировкой отражённого от Земли луча на приподнятом участке местности [5]. Существенное уменьшение экспериментальных значений E_z по сравнению с расчётными E (рис.4б,5б -Листвянка, рис. 5а,б,в -Шелехов) можно объяснить экранировкой прямого луча рельефом местности между передающей и приёмной антеннами, когда приём УКВ возможен при дифракции волн на препятствиях, что даёт дополнительное ослабление поля [1]. Поэтому в дальнейшем представляет интерес оценка точности методов расчёта напряжённостей поля УКВ, позволяющих учесть такое ослабление при задании рельефа местности. Таблица 2 характеризует точность расчётов напряжённостей поля УКВ по формуле Введенского и по двухлучевой модели за исключением ситуаций с экранировкой прямого луча рельефом местности.

Таблица 2. Средние отношения измеренных и рассчитанных напряжённостей поля

Учёт высот	да			нет		
	48.5	88	217	48.5	88	217
Частота, МГц	48.5	88	217	48.5	88	217
$(E_z/E_{в})_{ср}$	0,84	0,71	0,32	0,80	0,61	0,29
$(E_z/E)_{ср}$	1,03	0,91	0,43	0,99	0,74	0,40

Таблица 2 показывает хорошее соответствие измеренных и рассчитанных по двухлучевой модели средних значений E для 1 и 3 телевизионных каналов, когда формула Введенского даёт завышенные значения E . Для $f=217$ МГц расчётные напряжённости поля больше, чем в 2 раза превышают измеренные. Отметим, что согласно рекомендациям [2] для высоты передающей антенны ИОРТПЦ в 170 м вводится поправка на повышенное затухание для этой частоты.

Выводы

- Разработан алгоритм и программа расчёта напряжённости поля УКВ, основанные на двухлучевой модели формирования поля, учитывающие поляризацию радиоволн, параметры передающей аппаратуры, расстояния до пунктов измерения и высоты этих пунктов, проводимость и диэлектрическую проницаемость почвы между передающей и приёмной антеннами при расчётах модулей и фаз коэффициентов отражения радиоволн поверхностью Земли.

- Экспериментально подтверждена более высокая точность двулучевой модели формирования поля УКВ по сравнению с расчётами напряжённости поля по формуле Введенского.
- Показано повышение точности расчётов E при задании высот пунктов измерений.
- Показана возможность усиления поля УКВ на возвышенных участках местности за счёт экранировки отражённого от поверхности Земли луча, а также ослабление поля УКВ при экранировке прямого луча рельефом местности между передающей и приёмной антеннами.
- Показано увеличение дополнительного ослабления поля УКВ по сравнению с расчётами по двулучевой модели при увеличении рабочей частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. - М.: Связь. – 1972.- 336 с.
2. Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны. - М.: Связь. – 1985.- 536 с.
3. Агарышев А.И., Власов В.Г., Куклин В.Л., Краев Ю.Н. Сравнение результатов измерений и расчётов напряжённостей поля радиоволн УКВ диапазона на основе приёма сигналов телевидения // Современные проблемы радиоэлектроники и связи: материалы VIII Всерос. науч.-тех. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых.–Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009.–С.33-39.
4. Агарышев А.И., Воробьев А.Н., Краев Ю.Н., Свергуни Ю.В. Анализ результатов измерений и расчётов напряжённостей поля радиоволн в окрестности радиотелепередающего центра // Современные проблемы радиоэлектроники и связи: Материалы VII Межвузовской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых.– Иркутск: ИрГТУ, 2008. – С. 141-145.
5. Агарышев А.И., Жигалов А.С., Зверев А.Г. Увеличение напряжённости поля УКВ при экранировании отражённой от Земли радиоволны неоднородностями рельефа местности // Современные проблемы радиоэлектроники и связи: Материалы VI Межвузовской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых.–Иркутск: ИрГТУ, 2007. – С. 40-45.
6. Локшин М.Г., Шур А.А., Кокорев А.В., Краснощёков Р.А. Сети телевизионного и звукового ОВЧ ЧМ вещания: Справочник. – М.: Радио и связь. – 1988. – 144 с.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ С ПОМОЩЬЮ СЕТИ ПРИЕМНИКОВ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ

А.А. ВАСИЛЬЕВ, О.Г. ХУТорова

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, г. Казань, Кремлевская, 18,
E-mail: vasalan@mail.ru*

Данная статья посвящена изучению вертикальной структуры атмосферы по измерениям сети приемников ГЛОНАСС и GPS. Сравнение результатов дистанционного зондирования с данными метеостанции, радиозондирования и реанализа показало хорошее согласие.

A.A. VASILIEV, O.G. KHUTOROVA

This paper is dedicated to research the atmosphere by network of GPS and GLONASS receivers. The comparison of remote sensing results with meteorological and reanalysis data shows the good accordance.

В настоящее время актуальны задачи развития методов всепогодного зондирования атмосферы. В связи с этим несомненный интерес представляют широкие возможности применения радиосигналов глобальных сетей позиционирования GPS и ГЛОНАСС [1].

Цель данной работы состоит в том, чтобы представить экспериментальные результаты пассивного зондирования структуры индекса рефракции радиоволн в тропосфере с помощью системы наземных GPS - ГЛОНАСС приемников, разнесенных в пространстве. Наша задача состояла в том, чтобы получив данные с приемной аппаратуры, восстановить вертикальную структуру тропосферы.

Тропосферная задержка радиосигнала ΔL , измеренная каждой антенной в приближении сферической симметрии атмосферы с учетом искривления луча

$$\Delta L = \int_{h_a}^{H_t} \frac{(r_0 + h) \cdot N(h)}{\sqrt{(r_0 + h)^2 + \left(\frac{n_0}{1 + N(h)}\right) r_0^2 \cos^2(\theta)}} dh \quad (1)$$

где θ – угол места трассы спутник-приемник, r_0 - радиус Земли, h – высота, n_0 – приземный коэффициент преломления. Интеграл взят от высоты приемной антенны h_a до высоты тропосферы H_t .

Задача сводится к решению интегрального уравнения (1) относительно высотного профиля индекса рефракции. Уравнение (1) имеет нелинейное ядро, в которое входит искомым профиль, поэтому мы применили для его решения итерационный алгоритм и метод Тихонова решения обратных задач [4]. Минимизация функционала Тихонова проводилась в граничных условиях, заданных данными эмпирической модели, модельные расчеты индекса рефракции тропосферы показали, что высоту тропосферы можно взять приближенно равной 10 км. При фазоразностном методе влияние нейтральной атмосферы, находящейся выше 10 км, меньше, чем точность измерения фазы приемником. Из уравнения (1) составляется система уравнений для промежутка во времени около 30 минут. Далее производится минимизация нормы невязки. Затем производится выбор наилучшего решения. Было установлено, что точность решения слабо зависит от начального приближения, подставляемого в ядро, но сильно зависит от параметра минимизации функционала Тихонова [4]. Обычно решение сходится к третьему шагу итерационного алгоритма. При разработке методики мы учитывали точностные характеристики фазовых измерений. Модельные расчеты показали, что решение достигается даже при ошибках измерения фазы на порядок больших, чем в применяемой аппаратуре. Особенно был отмечен тот факт, что при сравнении приземных значений, рассчитанных

с помощью нашего метода и эмпирических данных, полученных с помощью метеостанции, среднее отклонение составляло менее 0,25 N-единиц. В качестве априорной информации мы используем двухлетние наблюдения и высокоточные эфемериды, благодаря которым точность восстановления профилей индекса рефракции имеет погрешность относительно метода реанализа не более 5 %.

Приемники непрерывно измеряют дальность для каждого видимого спутника по кодам C/A и P на двух частотах, соотношение сигнал/шум, фазы сигналов и системное время UTC[2]. Вся информация в реальном времени записывается в базу данных.

Составлен комплекс программ выполняющих следующие действия:

- Сбор данных с приемников сети
- Журналирование баз данных и их защита
- Выборка из базы данных фазовых и кодовых измерений
- Преобразование данных из двоичного формата, индивидуального приемника в унифицированный формат RINEX
- Синхронизация данных с каждого пространственно – разнесенного приемника
- Расчет ионосферной поправки по двухчастотным фазовым измерениям и исключение влияния ионосферы.
- Расчет дальности до спутников по точным эфемеридам.
- Расчет приращения зенитной тропосферной задержки.
- Тропосферная задержка радиосигнала ΔL , измеренная каждой антенной в приближении сферической симметрии атмосферы с учетом искривления луча по формуле (1).

В данный момент используется семь приемников спутниковых навигационных систем. В непрерывном режиме сетью станций собраны данные за несколько лет.

Для иллюстрации получаемых решений на рис.1 представлены результаты в сравнении с профилями индекса рефракции, рассчитанными по данным реанализа. Решения, полученные по 30 - минутным интервалам измерения сетью станций, усреднялись, среднеквадратичные отклонения также представлены на графиках. Первый пример (01.12.2008) показывает совпадение профилей в пределах среднеквадратического отклонения. Совпадение можно объяснить тем, что данные реанализа сильно сглажены, как и усредненный профиль, полученный по данным сети приемников, охватывающих территорию 35×20 км. Второй пример (01.03.2009) демонстрирует хорошее совпадение решений и независимых данных только на высотах 500-3000 м.

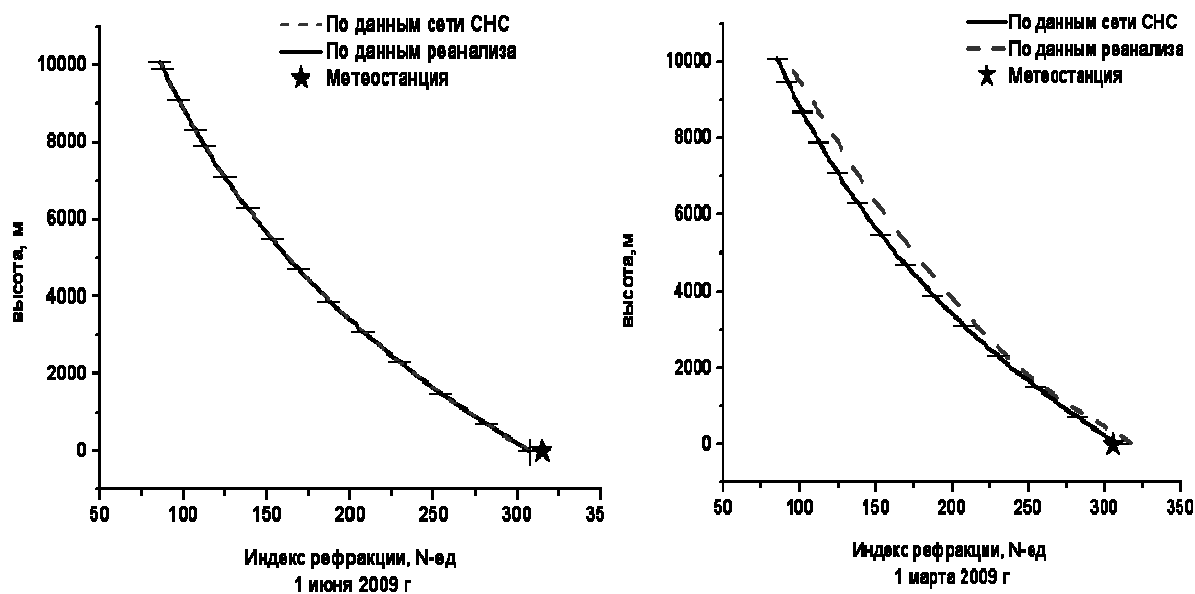


Рис. 1. Высотные профили индекса рефракции 01.06.09 г. и 01.03.09 г.

Мы провели сравнение решения обратной задачи с профилями индекса рефракции, определенных по радиозондовым данным за период 05.08 - 31.08. 2008 г. На рис. 2 показан пример сравнения профилей. По всему периоду сравнения мы определили средние отклонения

результатов пассивного зондирования индекса рефракции от измеренных аэрологическим способом оно составило 0,2 N-ед в слое до 500 м и -1,4 N-ед на высотах 9500-10000 м, среднеквадратичное отклонение – 6,8 и 3,4 N-ед соответственно. Такие величины отклонений показывают хорошее соответствие результатов дистанционного зондирования и независимых радиозондовых измерений. Среднеквадратические отклонения, скорее всего, определяются пространственными мезомасштабными вариациями индекса рефракции, как показано в их интенсивность уменьшаются с высотой.

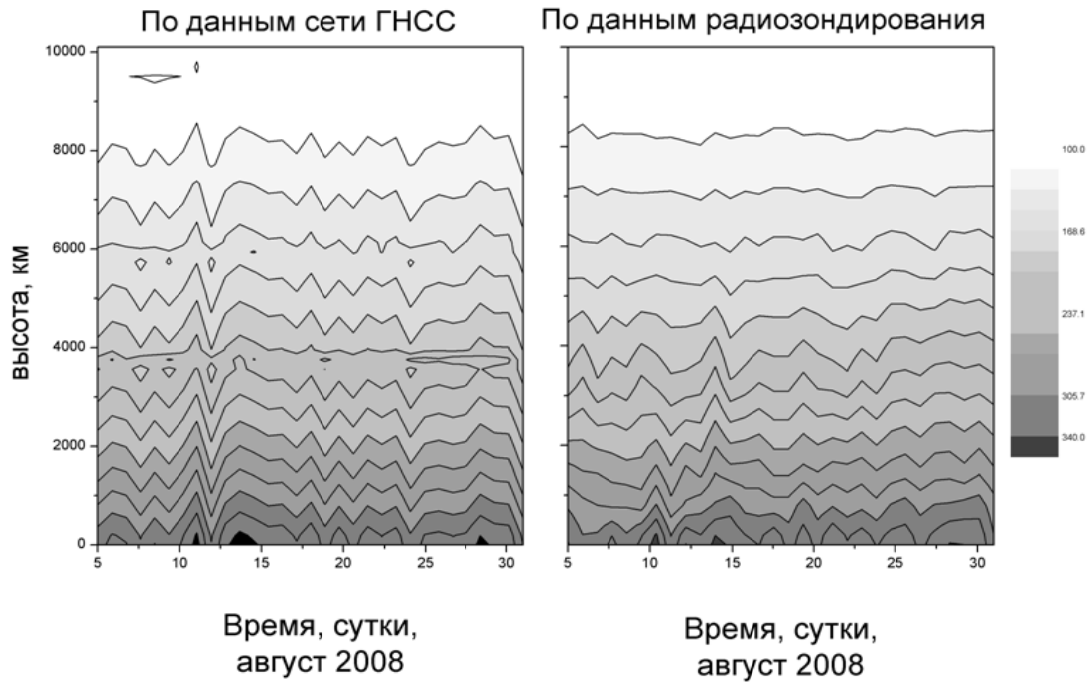


Рис.2. Высотные профили индекса рефракции радиоволн и их сравнение с данными радиозондирования

Из рис.2 видно, что структура индекса рефракции обнаруживает существенные межсуточные вариации, связанные с синоптическими атмосферными процессами. Среднеквадратическое отклонение индекса рефракции от среднего составляет 15 и 5 N-ед. на высотах до 500 м и 9500-10000 м соответственно. Как видно, различия данных дистанционного (ГНСС) и аэрологического зондирования значительно меньше, чем межсуточные вариации индекса рефракции.

В работе показано, что радиотрассы, приходящие под разными углами от спутников ГНСС на пространственно разнесенные приемники позволяют решить обратную задачу восстановления профиля индекса рефракции радиоволн с достаточно высокой точностью.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (Государственный контракт № П162).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Азизов А.А., Гайкович К.П., Кашкаров С.С. [и др.] // Изв. ВУЗов. Радиофизика.- 1998.- Т.41, № 9. С.1116-1125.
2. Hofmann-Wellenhof, B. Global Positioning System. Theory and Practice [Text] / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins New York: Springer.- 2001. – 356 p.
3. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач/ В. Я Арсенин, А.Н. Тихонов М: Мосиздат. – 1974. – 324 с.

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ ИНДЕКСА РЕФРАКЦИИ В ВОСТОЧНЫХ РАЙОНАХ РОССИИ

Н.Ц. ГОМБОЕВ, А.С. БАТОРОЕВ

*Отдел физических проблем Бурятского научного центра СО РАН,
670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8,
E-mail: borto@pres.bsnet.ru*

На основе 10-летних наблюдений на 30 аэрологических станциях впервые проанализированы вертикальные корреляционные связи r_N показателя преломления воздуха или индекса рефракции N в пограничном слое атмосферы над всей территорией Восточной Сибири, северо- и Дальнего Востока России. Установлено, что в нижнем 900-метровом слое атмосферы во все сезоны существует тесная корреляционная связь приземного значения индекса рефракции N_0 с его значениями в вышележащих слоях и уменьшается почти по линейному закону с увеличением толщины слоя. В сезонном ходе r_N во внутриконтинентальных районах максимум приходится на весенне-летнее время, минимум – на зимнее, а на побережье максимальные значения r_N наблюдаются зимой, минимальные – летом.

N.TZ. GOMBOEV, A.S. BATOROEV

At the first time vertical correlation relation r_N of air refraction index and refraction index of border atmosphere layer over all territory of East Siberia, North- and Far-East of Russia were analyzed on the base of 10-year period supervision to 30 aerologic stations. It is established that on the bottom 900-meter layer of atmosphere at all seasons exist the close correlation of the bottom layer refraction index N_0 with its values on the above lying layers and it are reduced on linear law with increasing of layer thickness. The maximum of seasonal trend of inside continental regions fall on the spring and summer period, minimum – on the winter, and on the sea coast the maximum values of r_N is observed at winter, the minimum values – at summer.

Требования к повышению эффективности и устойчивости работы радиоканалов связи делают актуальной задачу всестороннего изучения пространственно-временной структуры показателя преломления атмосферы n (индекса рефракции N) в различных климатических и физико-географических условиях на базе статистически надежных аэрологических данных.

Для более полного представления об особенностях пространственной структуры поля N целесообразно проанализировать его вертикальные связи в зависимости от времени суток, сезонов года и физико-географических и климатических условий.

Полученные результаты могут быть использованы для высотной экстраполяции приземных значений N_0 , что послужит целям построения пространственной модели поля N и актуально для прогнозирования работы различных радиотехнических систем [1] в условиях исследуемых регионов.

Показатель преломления n или связанный с ним индекс рефракции N рассчитывался по известной формуле [5, 6]:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = \frac{77,6}{T} \left(P + \frac{4810 \cdot e}{T} \right) \quad (1)$$

где P – атмосферное давление, ГПа; e – парциальные давления водяного пара, ГПа; T – абсолютная температура, К°. По формуле (1) вычислялись индивидуальные значения N за каждый срок измерений.

Исходным материалом послужили данные аэрологических наблюдений на 30 станциях радиозондирования за 10-летний период (1961-1971 гг.).

Межуровневые коэффициенты корреляции рассчитывались по известной формуле [7]:

$$r_N = \frac{K_N(2, k)}{\sigma_N(2) \cdot \sigma_N(k)}, \quad (2)$$

$$K_N(2, k) = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=j=1}^n N_i \cdot N_j - \frac{(\sum_{i=1}^n N_i) \cdot (\sum_{j=1}^n N_j)}{n} \right],$$

$$\sigma_N(2) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N}_i)^2}, \quad \sigma_N(k) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (N_j - \bar{N}_j)^2},$$

где $K_N(2, k)$ – корреляционные моменты N между уровнями 2 и $h(k)$ м, $\bar{N}(2)$ и $\bar{N}(k)$ – средние значения, $\sigma_N(2)$ и $\sigma_N(k)$ – средние квадратические отклонения N на уровнях 2 и $h(k)$ м, $k = (1 \dots 3$ или $1 \dots 4)$ – номер уровней, расположенных выше 2 м, $h(k) = l, 300, 600, 900$ м, где l – нестандартные высоты, расположенные между уровнями 2 и 300 м, n – число измерений.

Величины r_N определялись для четырех центральных месяцев сезонов (январь, апрель, июль, октябрь) по четырем срокам (утро, день, вечер, ночь) для стандартных слоев 2-300, 2-600, 2-900 м. Кроме того, при наличии первичных данных на нестандартных высотах на ряде станций рассчитывались также величины r_N на дополнительных слоях, расположенных ниже 300 м. Расчеты месячных значений r_N произведены по величинам r_N за каждый срок измерений. Из-за большого объема данных не приведены таблицы срочных, сезонных и среднегодовых значений r_N , которые использовались для анализа пространственно-временных изменений корреляционных функций в зависимости от времени суток и сезонов года.

На рис. 1а иллюстрируются среднегодовые межуровневые корреляционные функции r_N для типичных станций, представляющих различные климатические районы территории. Так, по данным станций Подкаменная Тунгуска, Якутск, Нагаева Бухта можно проследить поведение вертикальной корреляционной функции r_N примерно вдоль 60-ой параллели.

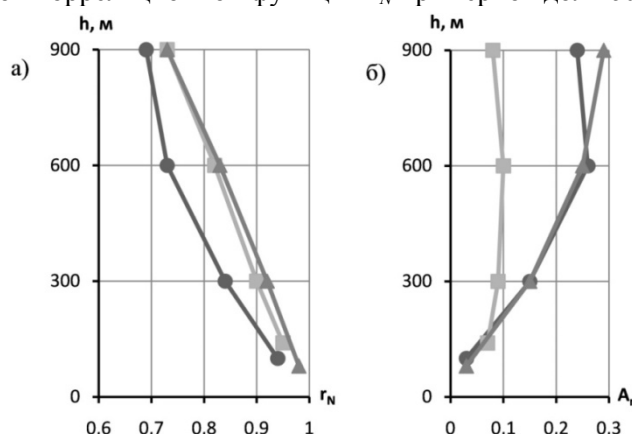


Рис. 1. Зависимость величин r_N а) и A_r б) от толщины слоя.
● – Якутск, ■ – Подкаменная Тунгуска, ▲ – Нагаева Бухта

Как видно из рис. 1а, вертикальные коэффициенты корреляции индекса рефракции во все сезоны года повсеместно положительны, причем наиболее тесная связь ($r_N > 0,8$) отмечается в самом нижнем слое атмосферы. По мере увеличения расстояния между коррелируемыми уровнями коэффициенты корреляции r_N уменьшаются, однако даже в слое 2-900 м они оказываются повсеместно более 0,5, то есть являются значимыми. Анализ сезонных значений r_N показал, что затухание корреляционных связей N над различными районами в зависимости от сезона года происходит с разной интенсивностью.

Зимой над центральными районами Восточной Сибири, особенно над Якутией, связи N по высоте ослабевают гораздо быстрее, нежели над западными и восточными районами. В слое 2-900 м над Якутском функция $r_N = 0,6$, в Подкаменной Тунгуске – 0,7, в Нагаевой Бухте – 0,8. Подобная закономерность затухания корреляционных связей по высоте свойственна температуре воздуха [8]. Зимой интенсивное ослабление связи температуры обусловлено влиянием холодного азиатского антициклона, с которым связаны мощные приземные инверсии тепла и влаги. На западе Среднесибирского плоскогорья, испытывающем отчасти влияние Атлантики, и на Дальнем Востоке инверсии температуры воздуха выражены слабее,

и отмечается интенсивное вертикальное перемешивание, которое обуславливает более слабое затухание с высотой температуры и влажности, а, следовательно, и коэффициента преломления воздуха. Влияние оз. Байкал на межуровневую связь коэффициента преломления проявляется в ее замедлении по сравнению с внутриконтинентальными районами Забайкалья, однако эти различия невелики (Δr_N не более $0,1 \div 0,2$). Характерно, что каких-либо заметных различий r_N в зависимости от времени суток в зимнее время не наблюдается.

Летом характер межуровневой корреляционной связи отличается от зимнего. Достаточно сравнить профили функции r_N вдоль 60° с.ш. Над Якутией отмечаются наиболее устойчивые связи во всем 900-метровом слое, в то время как в крайних восточных районах территории затухание связи интенсивнее. Особенно заметен этот контраст в дневное и вечернее время суток. Например, днем в Нагаевой бухте r_N уменьшается от значения 0,95 в нижнем 100-метровом слое до значения 0,5 в слое 2-900 м. В Якутии тесная связь (r_N не менее $0,8 \div 0,9$) сохраняется во всем рассматриваемом 900-метровом слое. Интенсивно происходит ослабление связей N и над Байкалом. Отмеченные особенности, свойственные корреляционным связям коэффициента преломления воздуха, согласуются с аналогичным ходом связи в пограничном слое влажности воздуха [8], поскольку поле влажности летом формируется в основном за счет конвективного переноса влаги по высотам, который над континентальными районами выражен сильнее, особенно в дневные часы.

В апреле различия в характере межуровневой связи r_N по территории уменьшается, лишь в Якутии в ночные часы, в условиях интенсивных инверсий, отмечается зимний тип профиля r_N . Благодаря усилению конвективных процессов днем связи N более устойчивы ($r_N > 0,8$), чем в утренние часы.

Вертикальные профили r_N в октябре по характеру близки к январским. Наиболее устойчивые связи отмечаются на востоке территории, не менее 0,85, а в Якутии в слое 2-900 м величины r_N составляют $0,5 \div 0,6$.

На рис.1,б показана зависимость амплитуды межсезонных колебаний корреляционных функций A_r от толщины слоя для трех вышеуказанных станций. Как видим, в пункте с резкоконтинентальным климатом (Якутск), а также и Нагаевой Бухте, где муссонный климат Охотского побережья характеризуется большой континентальностью зимой, прохладным морским – летом, амплитуды межсезонных колебаний A_r возрастают пропорционально толщине слоя, а в пункте Подкаменная Тунгуска с более умеренным климатом зависимость A_r от толщины слоя на высотах от 300 м и выше не выражена.

Типичные примеры сезонного хода величин r_N приведены на рис.2, где видно, что в районах с резкоконтинентальным климатом (Якутск) максимум r_N приходится в теплое время года, а минимум – на зимнее. Противоположен сезонный ход r_N в прибрежной полосе (Нагаева Бухта), где максимальные значения r_N наблюдаются зимой, а минимальные – летом. Амплитуды сезонного хода r_N прямо пропорциональны толщине слоя, а в самых нижних (менее 100 м) слоях сезонный ход величин r_N почти не выражен. На западе исследуемого района, характеризующегося сравнительно умеренным климатом (Подкаменная Тунгуска), сезонные различия величин r_N незначительны.

Суточные изменения межуровневых коэффициентов корреляции r_N в январе повсюду пренебрежительно малы и становятся заметными в летний и переходный сезоны с максимумом в дневное и с минимумом в ночное и утреннее время.

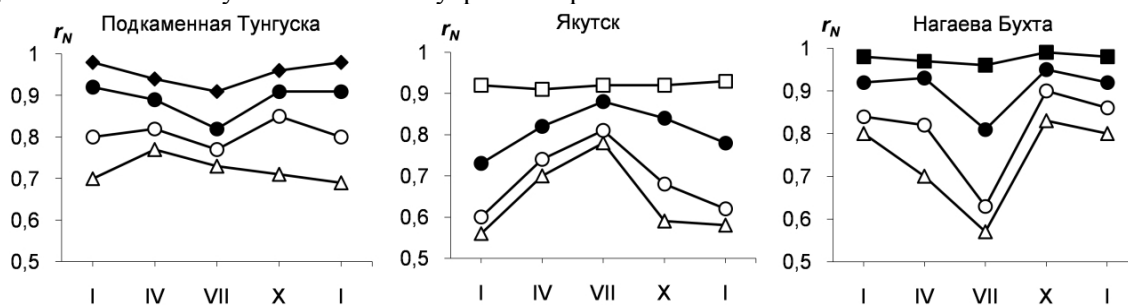


Рис.2. Примеры сезонного хода r_N . ● – $\Delta h = 2-300$ м, ○ – $\Delta h = 2-600$ м, △ – $\Delta h = 2-900$ м, ◆ – $\Delta h = 2-140$ м, □ – $\Delta h = 2-100$ м, ■ – $\Delta h = 2-80$ м

Заключение

1. На основе многолетних (10 лет) данных 30 аэрологических станций впервые проанализированы вертикальные корреляционные функции индекса рефракции r_N в нижнем 900-метровом слое атмосферы над территорией Восточной Сибири, северо- и Дальнего Востока России.

2. В нижнем 900-метровом слое атмосферы во все сезоны года корреляционные связи приземного значения коэффициента преломления с его значениями в выше лежащих слоях положительны и уменьшаются в основном почти по линейному закону с увеличением толщины слоя.

3. В сезонном ходе r_N во внутриконтинентальных районах максимум приходится на весенне-летнее время, минимум – на зимнее, а на побережье максимальные значения r_N наблюдаются зимой, минимальные – летом.

4. Суточные изменения r_N в зимнее время повсюду пренебрежимо малы, а в летний и переходные сезоны максимум r_N наблюдается в дневное, а минимум – в ночное время.

5. Установлена значительная корреляционная связь между вариациями приземных значений индекса рефракции N_0 и их вариациями в вышележащих слоях. Эту закономерность можно использовать для высотной экстраполяции N_0 , т.е. при оценочных расчетах в нижнем 900-метровом слое атмосферы вместо вертикальных градиентов g_N можно использовать легкодоступные приземные значения индекса рефракции N_0 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Поборгий Е.Д., Плотников А.А. Итоги и перспективы развития техники для внутризонной и сельской радиорелейной связи. – Электросвязь, 2002, №12, с.17-23.
2. Новый аэроклиматический справочник пограничного слоя атмосферы над СССР. Т.1. Под ред. И.Г. Гутермана– М.: Гидрометеоиздат, 1985.
3. Исаева А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. – М.: Изд. МГУ. – 1988. -188 с.
4. Казначеева В.Д., Хвостова Р.Н. Некоторые методические вопросы вычисления корреляционных связей метеорологических элементов в свободной атмосфере для нового аэрологического справочника СССР. Экспресс – информация. «Метеорология», Обнинск, ВНИИГМИ – МЦД, 1975, вып. 9 (41), с. 3-13.
5. Бин Б.Р., Даттон Е.Дж. Радиометеорология. Перевод с англ. Арсеньян Т.И. Под ред. Семенова А.А. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. -362 с.
6. Гомбоев Н.Ц., Цыдыпов Ч.Ц. Рефракционные свойства атмосферы континентальных районов. – Новосибирск, Наука, 1985. 126 с.
7. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М.: «Наука», 1971, - 576.
8. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонентов атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. -264 с.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ КОГЕРЕНТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАТРИЧНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЗЕМНЫХ ТРАСС В 3-СМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

К.И. ЗАЙЦЕВ, А.С. МЯГКОВ, М.В. ОСИПОВ, А.В. ХРИСТЕНКО,
Ю.П. АКУЛИНИЧЕВ, М.Е. РОВКИН, В.А. ХЛУСОВ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40, E-mail: rovkin@micran.ru*

Описан измерительный комплекс, который спроектирован и реализован на базе цифрового формирователя сигналов, разработанного ЗАО НПФ «Микран». Основной задачей экспериментальных измерений и достоинством комплекса является оценка матричной импульсной характеристики радиоканала при прямом прохождении широкополосного радиосигнала (до 640 МГц) X-диапазона. Мобильность комплекса, а так же энергетические параметры излучаемого сигнала позволяют оперативно измерять характеристики радиоканалов различного типа и дальности.

THE MEASUREMENT COMPLEX FOR BROADBAND COHERENT MEASUREMENT OF MATRIX PULSE RESPONSE CHARACTERISTICS OF NEAR-SURFACE CHANNELS IN X BAND

K.I. ZAYCEV, A.S. MYAGKOV, M.V. OSIPOV, A.V. KHRISTENKO,
U.P. AKULINICHEV, M.E. ROVKIN, V.A. KHLUSOV

The measurement complex based on the digital signal generator that was designed by "MICRAN" is considered. The estimation of matrix pulse response characteristics of channel in case of broadband radiosignal (up to 640 MHz) direct propagation is the main goal. The complex mobility and energetic parameters of radiated signal make it possible to estimate characteristics of various radiochannels with different distances.

Введение

Широкое распространение радиотехнических систем связи, в частности радиорелейных станций, обуславливает постоянный рост требований к их техническим характеристикам, в том числе и к скорости передачи данных. Одним из путей увеличения указанной характеристики является расширение полосы спектра излучаемого сигнала. Мгновенные измерения коэффициента передачи радиоканала на приземных трассах в широком спектре частот позволяют оценить на этапе проектирования максимальную пропускную способность радиосистем связи, а также обосновать алгоритмы адаптации связной аппаратуры. Актуальность таких исследований подтверждается аналогичными работами зарубежных специалистов [1, 2].

Цель работы

Практическое внедрение методов оперативного широкополосного зондирования приземных трасс.

Алгоритм функционирования комплекса

Принципы функционирования измерительного комплекса основаны на зондировании приземной трассы электромагнитным сигналом с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Выбор сигнала обусловлен техническими возможностями в реализации аппаратуры цифрового генерирования и цифровой обработки принимаемых сигналов. Энергетический потенциал комплекса достигается путем непрерывного излучения ЛЧМ-сигнала мощностью до 7 Вт и его когерентной обработки при приеме, что является достаточным для измерения характеристик открытых и полузакрытых трасс протяженностью 60 км и более. При зондировании ЛЧМ-сигналом импульсная характеристика канала распространения (трассы) оценивается путем сравнения излученного и принимаемого сигналов (гомодинная обработка), при этом спектр задержек канала распространения отображается в виде частотного спектра сигналов биений этих сигналов. Такой метод [3] не требует больших вычислительных затрат и высокого

быстродействия отдельных узлов цифрового приемника. Известные ограничения при использовании ЛЧМ-сигнала на однозначность оценки скорости изменения длины трассы в данном случае не принципиальны, поскольку на интервалах времени оценки ~ 7 мс характеристики трассы меняются незначительно. Структурная схема комплекса изображена на рис 1.

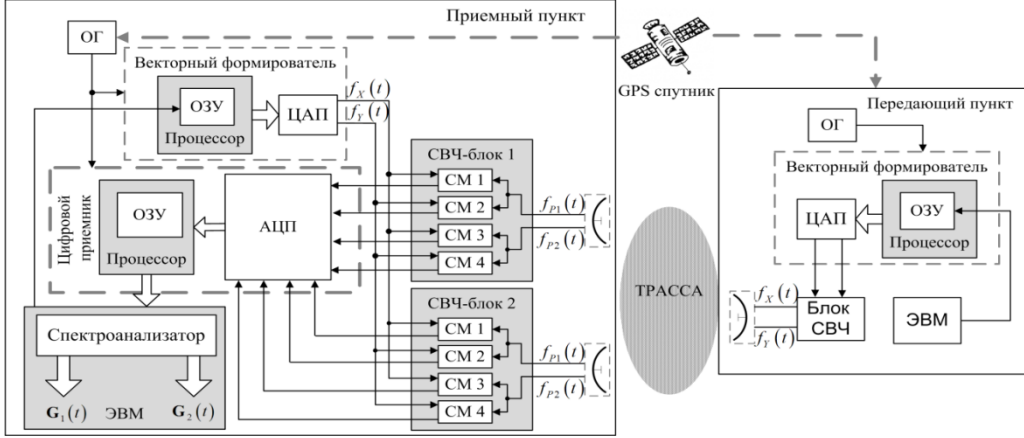


Рис. 1. Структурная схема измерительного комплекса

Излучаемый комплексом векторный сигнал описывается вектором Джонса

$$\mathbf{e}_0(t) = \begin{pmatrix} \dot{f}_X(t) \\ \dot{f}_Y(t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\dot{f}_X(t)$ и $\dot{f}_Y(t)$ – комплексные огибающие ортогональных компонент (горизонтальная и вертикальная соответственно) вектора, описывающего излучаемое поле и представленного в линейном поляризационном базисе. Этот базис является собственным для антенной системы передающего устройства. Комплексные функции $\dot{f}_X(t)$ и $\dot{f}_Y(t)$ описывают временную структуру двух ортогональных ЛЧМ сигналов:

$$f_X(t) = \begin{cases} A_0 e^{j\left(\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2} + \frac{\Delta\omega \cdot t}{T_C}\right) \cdot t} & \text{для } 0 \leq t \leq T_C; \\ 0 & \text{для } t < 0, t > T_C. \end{cases} \quad f_Y(t) = \begin{cases} A_0 e^{j\left(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} - \frac{\Delta\omega \cdot t}{T_C}\right) \cdot t} & \text{для } 0 \leq t \leq T_C; \\ 0 & \text{для } t < 0, t > T_C. \end{cases} \quad (2)$$

Преобразование средой распространения частотно-временных свойств и поляризационной структуры излучаемого поля может быть представлено в виде дискретной матричной функции отклика, имеющей вид:

$$\mathbf{G}(\tau) = \sum_{k=0}^N \left\{ \mathbf{S}_k \cdot \delta(\tau_k) \right\} = \sum_{k=0}^N \mathbf{g}_k(\tau), \quad (3)$$

где τ_k – время задержки сигнала относительно момента излучения в k -ом канале распространения сигнала, $\delta(\tau_k)$ – дельта функция, заданная в точке τ_k , \mathbf{S}_k – матрица пропускания k -ого канала (матричный коэффициент передачи):

$$\mathbf{S}_k = \begin{pmatrix} \dot{S}_{11} & \dot{S}_{12} \\ \dot{S}_{21} & \dot{S}_{22} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

В этом случае принимаемый векторный сигнал имеет вид:

$$\mathbf{e}_p(t) = \mathbf{G}(\tau) * \mathbf{e}_0(t) = \sum_{k=0}^N \left\{ \mathbf{S}_k \cdot \mathbf{e}_0(t - \tau_k) \right\} = \begin{pmatrix} f_{p1}(t) \\ f_{p2}(t) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Умножение каждой из ортогональных компонент принимаемого сигнала $\dot{f}_{p1}(t)$ и $\dot{f}_{p2}(t)$ на компоненты излученного сигнала $\dot{f}_X(t)$ и $\dot{f}_Y(t)$ и последующее «скользящее» усреднение результатов умножения по интервалу $T_{уср}$, удовлетворяющему неравенству $T_C > T_{уср} > 2\pi/\omega_0$, определяют, с точностью до постоянного комплексного множителя m , сигналы на выходах усредняющих фильтров в следующем виде:

$$\langle f_X(t) \cdot f_{P1}(t) \rangle = m \cdot \sum_{k=0}^N \left(\mathbf{S}_{11}^k \cdot \exp \left\{ j \left[\frac{\Delta\omega \cdot t_k}{T_C} \cdot t - \left(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \right) \cdot t_k \right] \right\} \right) = \sum_{i=0}^N \left(m \cdot \mathbf{S}_{11}^k \cdot e^{j(\Omega_k t - \phi_k)} \right); \quad (6)$$

$$\langle f_X(t) \cdot f_{P2}(t) \rangle = m \cdot \sum_{k=0}^N \left(\mathbf{S}_{21}^k \cdot \exp \left\{ j \left[\frac{\Delta\omega \cdot t_k}{T_C} \cdot t - \left(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \right) \cdot t_k \right] \right\} \right) = \sum_{i=0}^N \left(m \cdot \mathbf{S}_{21}^k \cdot e^{j(\Omega_k t - \phi_k)} \right); \quad (7)$$

$$\langle f_Y(t) \cdot f_{P1}(t) \rangle = m \cdot \sum_{k=0}^N \left(\mathbf{S}_{12}^k \cdot \exp \left\{ j \left[\frac{\Delta\omega \cdot t_k}{T_C} \cdot t - \left(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \right) \cdot t_k \right] \right\} \right) = \sum_{i=0}^N \left(m \cdot \mathbf{S}_{12}^k \cdot e^{j(\Omega_k t - \phi_k)} \right); \quad (8)$$

$$\langle f_Y(t) \cdot f_{P2}(t) \rangle = m \cdot \sum_{k=0}^N \left(\mathbf{S}_{22}^k \cdot \exp \left\{ j \left[\frac{\Delta\omega \cdot t_k}{T_C} \cdot t - \left(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \right) \cdot t_k \right] \right\} \right) = \sum_{i=0}^N \left(m \cdot \mathbf{S}_{22}^k \cdot e^{j(\Omega_k t - \phi_k)} \right); \quad (9)$$

где $\langle \rangle$ – операция «скользящего» усреднения, $\Omega_k = \Delta\omega \cdot t_k / T_C$; $\phi_k = (\omega_0 + \Delta\omega/2) \cdot t_k$. Как это следует из выражений (6-9), выходные сигналы усредняющих фильтров представляют собой сумму гармонических колебаний, частота Ω_i которых прямо пропорциональна положению дельта функций $\delta_i(t)$ в выражении (3), а амплитуды этих колебаний прямо пропорциональны соответствующим коэффициентам матрицы \mathbf{S}_k в выражении (3) для матричной импульсной характеристики цепи. Сказанное означает, что Фурье-спектры сигналов (6-9) в совокупности являются корректной оценкой матричной импульсной характеристики $\mathbf{G}(t)$ канала, по которому распространяется сигнал.

Состав и тактико-технические характеристики измерительного комплекса

Передающий пункт (см. рис.1) состоит из аппаратуры формирования опорных сигналов, СВЧ-блока и антенного устройства. В аппаратуре формирования передающего пункта на промежуточной частоте (ПЧ) 612,5 МГц цифровым методом формируются два сигнала с линейной частотной модуляцией. В СВЧ-блоке производится перенос спектра сигналов ПЧ на несущую частоту 9,8 ГГц. По коаксиальному кабелю СВЧ сигналы, соответствующие выражению (2), поступают на поляризатор антенного устройства и излучаются в пространство. Антенное устройство размещается на переносной треноге и представляет собой параболическое зеркало с рупорным облучателем, а также позволяет механическим путем изменять ширину диаграммы направленности. Передающий пункт является мобильным и предназначен для транспортировки на легковом автомобиле.

Приемный пункт (см. рис.1) состоит из двух антенных устройств с СВЧ-блоками, аппаратуры цифрового формирования опорных сигналов, и цифрового приемника. Антенные устройства приемного пункта аналогичны передающему. Пространственный разнос между облучателями приемных антенн может изменяться в пределах 1,1 ÷ 5 м. В смесителях СВЧ-блоков осуществляется операция умножения каждого поляризационного компонента принимаемого сигнала с компонентами излучаемого сигнала. В цифровом приемнике выходные сигналы смесителей преобразуются в цифровую форму, фильтруются и поступают в вычислительный процессор (ЭВМ), где производится операция БПФ и формируются оценки матричных импульсных характеристик $\mathbf{G}_1(\tau)$ и $\mathbf{G}_2(\tau)$ двух каналов распространения, образованных разнесенными в пространстве приемными антеннами и антенной излучения сигнала.

Так как передающий и приемный пункты комплекса разнесены в пространстве и не могут быть синхронизированы от единого (опорного) источника, то для согласованной обработки сигналов комплекса необходима синхронизация опорных генераторов пунктов, которая осуществляется с помощью рубидиевых стандартов частоты FS725 и спутниковых GPS-приемников. Стандарт частоты вырабатывает синусоидальный сигнал с частотой 10 МГц, с кратковременной нестабильностью частоты $\pm 2 \cdot 10^{-11}$ и фазовым шумом менее минус 130 дБн/Гц при отстройке на 10 Гц. Кроме того, имеется возможность синхронизации прибора от внешнего источника. Для этой цели в системе синхронизации используются GPS-приемники. Метки времени 1 Гц, формируемые приемниками сигналов GPS, имеют хорошую долговременную нестабильность (не более 10^{-12}) и плохую кратковременную нестабильность, обусловленную каналом распространения сигнала с орбиты до приемника GPS. Для синхронизации опорных генераторов приемного и передающего пунктов сигналом 1 Гц

используется фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ) рубидиевых стандартов с программируемой постоянной времени (от 8 минут до 18 часов). Лабораторные испытания системы синхронизации показали, что абсолютное временное рассогласование запускающих импульсов с выходов опорных генераторов приемного и передающего пунктов не превышает значения 20 нс и изменяется в этом интервале со скоростью не более 0,021 нс за секунду (в установившемся режиме работы рубидиевых стандартов с постоянной времени ФАПЧ 0,4 часа). Технические характеристики комплекса приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики комплекса

Наименование тактико-технической характеристики	Значение характеристик
Коэффициент шума приемных каналов	3 дБ
Несущая частота, ГГц	9.8
Регулируемая ширина диаграммы направленности антенн, град	2.3 – 8
Форма ДН	игольчатая, симметричная
Усиление антенн, дБ	38-27
Длительность линейно-частотного модулированного импульса, мс	6-23.8
Девияция спектра ЛЧМ сигнала, МГц	до 640
Разрешающая способность, не менее, м	0.3
Средняя излучаемая мощность, Вт	до 7

На этапе отладки аппаратуры комплекса была организована короткая трасса, представляющая собой пространственно-распределенный канал распространения радиоволн, где разные пути хода радиоволн обусловлены отражением от стены здания.

На рис. 2 представлены примеры регистрации откликов на выходе измерительного комплекса, полученных на короткой трассе, где $A_{i,j}$ и $B_{i,j}$ – оценки модулей элементов матричной функции отклика $G(t)$ трассы, образованной передающей антенной и антеннами первого и второго приемных каналов соответственно.

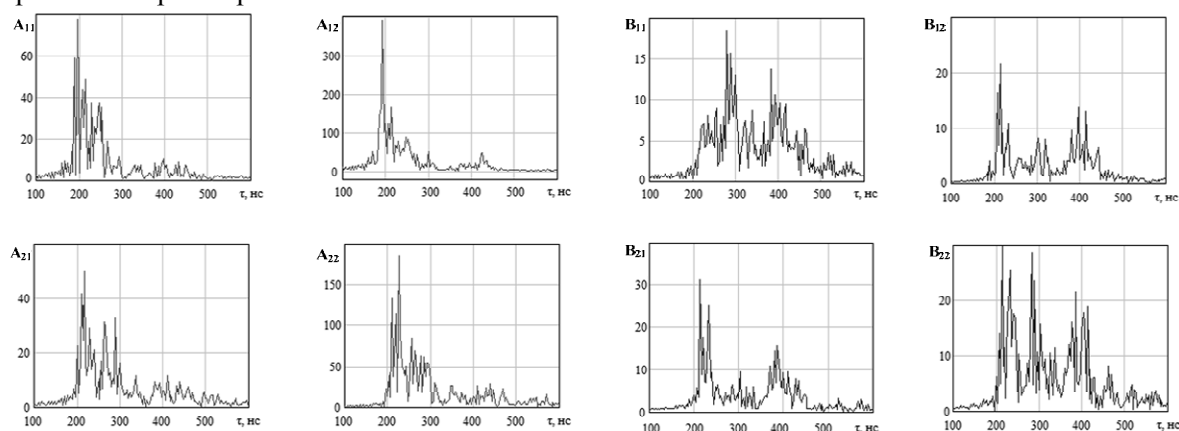


Рис. 2. – Результаты измерений на короткой трассе при девиации частоты 320 МГц

Заключение

Натурные испытания комплекса показали, что его технические характеристики соответствуют расчетным. Данная работа проведена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sylvain Ranvier, Mikko Kyrö, Katsuyuki Haneda, Tuomas Mustonen, Clemens Icheln, and Pertti Vainikainen. 2009. VNA-based wideband 60 GHz MIMO channel sounder with 3D arrays// Proceedings of the 2009 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS 2009). San Diego, CA, USA. 1822 January 2009, pp. 308-311.
2. Zetik R., Thomä R., Sachs J. “Ultra-Wideband Real-Time Channel Sounder and Directional Channel Parameter Estimation”, URSI EMTS 2004, Pisa, Italy, May 2004.
3. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. – М.: Радиотехника. 2004 г., 320 с., ил., 233-234с.

ФЛУКТУАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАДИОВОЛН НА ТРАССЕ ЗЕМЛЯ-СПУТНИК

А.С. ИВАНОВ, Ю.М. СТЕНИН

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18,
E-mail: nimarru@yandex.ru, bluezman@mail.ru*

Рассматривается распространение радиоволн дециметрового диапазона в тропосфере и влияние турбулентности на изменчивость параметров радиоволн, таких, как уровень амплитуды, фаза, угол прихода. Выполнена численная оценка величин флуктуаций по месяцам.

A.S. IVANOV, YU.M. STENIN

The paper deals with the spread of UHF radio waves through the troposphere and the effect of turbulence on the variability of parameters of radio waves such as the amplitude level, phase, angle of arrival. The numerical values of fluctuations in months are performed.

Введение

Общим недостатком использования любой радионавигационной системы является то, что при определённых условиях сигнал может не доходить до приёмника или приходиться со значительными искажениями или задержками. Даже на открытой местности при отсутствии рядом железобетонных конструкций, а также деревьев и прочих объектов, присутствуют случайные искажения мощности сигнала, его фазы, вызванные турбулентностью атмосферы. Это хорошо заметно владельцам GPS-приемников с индикаторами уровня амплитуды, а в том случае, когда данные с GPS используются в научных исследованиях, подобные скачки могут привести к неточности получаемых результатов. Поэтому необходимо подробно рассмотреть влияние турбулентности на параметры радиоволн дециметрового диапазона.

Цель работы – определить, какие неоднородности влияют на флуктуации параметров радиоволн в тропосфере: уровень амплитуды, фазу, угол прихода. Также следует численно оценить величины этих флуктуаций, их сезонную изменчивость, а также суточные вариации. Для решения задачи о флуктуациях будет использоваться метод плавных возмущений, который применялся А.М.Обуховым, В.И. Татарским при решении подобной задачи для волн метрового диапазона.

Математическая модель

Пространственное распределение флуктуаций показателя преломления δn определяется значениями флуктуаций температуры δn_T , влажности δn_e и давления δn_P . Для оценки вклада каждого из основных метеорологических параметров в изменение показателя преломления воздуха можно воспользоваться формулами [1, 2]:

$$\delta n_T = -\frac{77.6 \cdot 10^{-6}}{T^2} \left(P + \frac{9620e}{T} \right) \delta T, \quad (1)$$

$$\delta n_P = \frac{77.6 \cdot 10^{-6}}{T} \delta P, \quad (2)$$

$$\delta n_e = \frac{0.373}{T^2} \delta e, \quad (3)$$

$$\delta n = \delta n_T + \delta n_P + \delta n_e, \quad (4)$$

где T – температура воздуха, К;

P – атмосферное давление, гПа;

e – парциальное давление водяного пара, гПа;

δn_T – флуктуация температуры воздуха, К;

δn_p – флуктуация атмосферного давления, гПа;

δn_e – флуктуация парциального давления водяного пара, гПа.

Из анализа формул (1) – (4) видно, что наибольший вклад в изменение показателя преломления на радиочастотах у поверхности Земли вносит изменение парциального давления водяного пара (на 1 гПа), затем изменение температуры (на 1 К) и меньше всего влияет изменение давления. На высоте 5,5 км, согласно формуле (3), вклад флуктуаций влажности увеличивается за счет уменьшения температуры, однако содержание водяного пара и его флуктуации на этой высоте уже малы. Таким образом, флуктуации показателя преломления на этой высоте и выше обуславливаются только флуктуациями температуры воздуха [11].

Количественной характеристикой турбулентности является "закон 2/3" для поля скорости в развитой турбулентности, предложенный А. Н. Колмогоровым, в 1941 году [4], согласно которому разность между скоростями в точках M_1 и M_2 , удаленных друг от друга на расстояние r , описывается статистическим законом:

$$D_v(r) = \overline{(v_2 - v_1)^2} = C \varepsilon_e^{\frac{2}{3}} r^{\frac{2}{3}}. \quad (5)$$

где $D_v(r)$ – структурная функция поля скорости;

$V_{1,2}$ – скорость ветра в точках M_1 и M_2 , м/с;

C – численная константа, равная примерно 1,9;

ε_E – средняя скорость диссипации кинетической энергии в единице массы, м²/с³;

r – расстояние между точками наблюдения, м.

Статистическая структура турбулентности может быть описана структурными функциями не только для поля скорости ветра, но и для полей температуры T , влажности e , и показателя преломления электромагнитных волн n [6, 7]:

$$D_T(r) = \overline{(T_2 - T_1)^2} = C_T^2 r^{\frac{2}{3}}, \quad (6)$$

$$D_e(r) = \overline{(e_2 - e_1)^2} = C_e^2 r^{\frac{2}{3}}, \quad (7)$$

$$D_n(r) = \overline{(n_2 - n_1)^2} = C_n^2 r^{\frac{2}{3}}, \quad (8)$$

где $D_T(r)$, $D_e(r)$, $D_n(r)$ – структурные функции поля температуры, влажности и показателя преломления электромагнитных волн, соответственно;

C_T – структурный коэффициент поля температуры;

C_e – структурный коэффициент поля влажности;

C_n – структурный коэффициент поля показателя преломления электромагнитных волн;

r – расстояние между двумя точками наблюдения, м.

Структурный коэффициент C_n^2 может быть определен через структурные коэффициенты флуктуаций температуры C_T^2 и влажности C_e^2 :

$$C_n = -\frac{77.6 \cdot 10^{-6}}{T^2} \left(P + \frac{9620e}{T} \right) C_T + \frac{0.373}{T^2} C_e, \quad (9)$$

которые могут быть рассчитаны по данным аэрологических наблюдений:

$$C_T^2 \approx a^2 \frac{k^{2/3}}{\left(\frac{dT}{dz} \right)^{2/3}} \left(\frac{dT}{dz} + \gamma_a \right)^2, \quad (10)$$

$$C_e^2 \approx a^2 \frac{k^{2/3}}{\left(\frac{dV}{dz} \right)^{2/3}} \left(\frac{de}{dz} \right)^2, \quad (11)$$

где a^2 – коэффициент, зависящий от числа Ричардсона Ri [9];

k – постоянная Кармана, равная 0,4;

$\frac{dT}{dz}$ – вертикальный градиент температуры, К/м;

$\frac{de}{dz}$ – вертикальный градиент влажности, гПа/м;

$\frac{dV}{dz}$ – вертикальный градиент ветра, с⁻¹;

γ_a – сухоадиабатический градиент температуры воздуха, равный $0,98 \times 10^{-2}$ К/м.

В работе [8] с помощью метода плавных возмущений были выведены формулы для вычисления флуктуаций, соответственно, уровня амплитуды, фазы, угла прихода:

$$\overline{\chi^2} = 0,56 \cdot k^{7/6} \int_0^L C_n^2(z) (L-z)^{5/6} dz, \quad (12)$$

$$D_s(\rho) = 2,91 \cdot k^2 \cdot \rho^{5/3} \int_0^L C_n^2(z) dz, \quad (13)$$

$$\overline{\alpha^2} = 1,64 \cdot L \cdot \lambda_0^{-1/3} \int_0^L C_n^2(z) dz, \quad (14)$$

где k – волновое число, ρ – расстояние между двумя точками, L – длина трассы, проходимой волной, λ_0 – внутренний масштаб неоднородности. Таким образом, решение уравнений сводится к определению вида структурного коэффициента $C_n^2(z)$ и проведению численного интегрирования по тропосфере ($L = 12\,000$ м).

Для нахождения высотного профиля структурного коэффициента C_n^2 были использованы метеорологические данные в приземном слое, а также данные зондирования атмосферы Казани, взятые с сайта Institute of Wyoming по месяцам 2010 года, снятые в 00 часов и в 12 часов. Расчеты интегралов производились в среде Mathcad 14.

Рассмотрим полученные данные. На рис.1(а) изображен график сезонного хода для флуктуаций амплитуды, выраженной в процентах относительно максимальной амплитуды сигнала. По сути, это набор мгновенных значений, для 1-го числа каждого месяца, определенных в 00 и в 12 часов. Из графика видно, что разброс флуктуаций по месяцам лежит в интервале от 2 до 10 %. Флуктуации фазы (рис.1б) находятся в интервале 10 – 60 угловых секунд, а угол прихода (рис. 1в) – имеет порядок одной угловой минуты. В связи с тем, что в тропосфере, как было отмечено выше, наибольшее влияние оказывают флуктуации влажности и, в меньшей степени, температуры, разброс значений на графиках сезонной изменчивости параметров можно объяснить сезонным ходом относительной влажности, повышающейся весной и летом в дождливый период, а также зимой, во время снегопада или таяния снега. Минимумы приходятся на засушливую часть лета 2010 года.

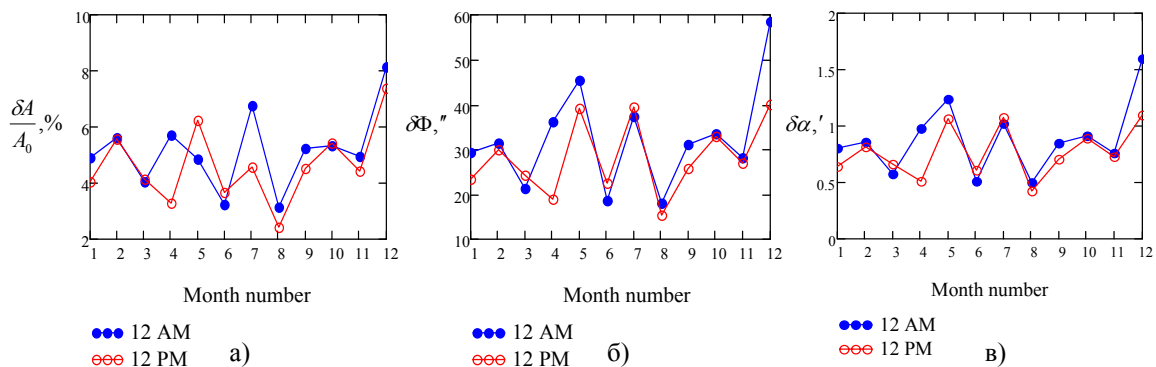


Рис. 1. Сезонный ход флуктуаций параметров радиоволн:
 а) флуктуации уровня амплитуды; б) флуктуации фазы (в угловых секундах);
 в) флуктуации угла прихода (в угловых минутах)

Результаты по флуктуациям уровня амплитуды находятся в хорошем соотношении с показаниями GPS-приемника, на индикаторе которого отображается мощность сигнала. Колебания мощности усиливаются при повышении относительной влажности воздуха. Что же

касается данных по фазе и углу прихода, они адекватны значениям, вычисленным ранее в монографии [10]. Таким образом, приведенная выше модель позволяет достаточно точно оценить величину флуктуаций параметров радиоволн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казаков Л. Я., Ломакин А. Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. – М.: Наука, 1976. – 165 с.
2. Пахомов Л. А., Пинус Н. З., Шмелер С. М. Аэрологические исследования изменчивости коэффициента преломления атмосферы для ультракоротких волн. – М.: Гидрометеиздат, 1960. – 103 с.
3. Татарский В. И. Микроструктура температурного поля в приземном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1956, №6, с. 689-699.
4. Колмогоров А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Докл. АН СССР, 1941, Т. 30, №4, с. 299-303.
5. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. - 413 с.
6. Обухов А. М. Атмосферная турбулентность // Турбулентность и динамика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1988, с. 173-183.
7. Татарский В. И. Теория флуктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1959, 232 с.
8. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере.- М.: Наука, 1967.- 548 с.
9. Гурвич А. С. и др. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере / А. С. Гурвич, А. И. Кон, В. Л. Миронов, С. С. Хмелевцов. – М.: Наука, 1976. – 277 с.
10. Тептин Г.М., Стенин Ю.М. Неоднородная структура нижней ионосферы и распространение радиоволн, Изд. Казанского университета, 1989
11. Чукин В.В. Исследование атмосферы методом электромагнитного просвечивания. Монография. – СПб, изд. РГГМУ, 2004. – 107 с.
12. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. – М. Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 392 с.

**ХАРАКТЕРИСТИКИ УКВ-СИГНАЛОВ ЗА РАДИОГОРИЗОНТОМ
ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ПРОИЗВОЛЬНО НАКЛОНЕННЫХ
МЕЗОМАСШТАБНЫХ СЛОЕВ (КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)**

О. Н. КИСЕЛЕВ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, НИИ РТС,
E-mail: rwplab@ms.tusur.ru*

Выполнен ряд компьютерных экспериментов по изучению флуктуаций углов прихода радиоволн, отраженных произвольно наклонными мезомасштабными тропосферными неоднородностями за радиогоризонт. Для принятых при расчетах параметрах неоднородностей модельные числовые характеристики таких флуктуаций согласуются с опытными данными. Сделан вывод, что этот механизм играет существенную роль при распространении радиоволн за пределами радиогоризонта.

**CHARACTERISTICS VHF SIGNALS BEYOND RADIO HORIZON
BY REFLECTION FROM ARBITRARILY TILTED MESOSCALE LAYERS
(COMPUTER EXPERIMENT)**

O.N. KISELEV

Computer simulation to study the fluctuations of the angles of arrival of radio waves reflected from the tilted mesoscale inhomogeneities of the troposphere, in the case when the signal was received beyond the radio horizon, was performed. Model numerical characteristics of these fluctuations, obtained for the selected parameters of inhomogeneities, in agreement with experimental data. Results that were obtained suggest that this mechanism plays a significant role in the propagation of radio waves beyond the radio horizon.

Введение

В настоящее время считается, что основные закономерности дальнего тропосферного распространения (ДТР) радиоволн хорошо изучены и дальнейшие исследования этого явления проводятся лишь в целях решения отдельных частных задач [1, 2]. Однако, хотя для изучения проблем ДТР выполнен огромный объем работ, фундаментальный вопрос этого явления – механизм формирования поля УКВ за радиогоризонтом – так и не нашел своего решения [3]. Указывается несколько примеров экспериментально зарегистрированных явлений, не имеющих объяснений с позиций существующих теорий, в первую очередь, с позиции теории рассеяния радиоволн на турбулентных неоднородностях. Список явлений, не имеющих объяснения, включает: экспериментальные распределения уровня сигнала лишь в одной трети случаев удовлетворяют закону Релея; дисперсия медленных флуктуаций зависит от направленности антенн; ширина углового спектра сигнала по вертикали в 1,5-2 раза больше, чем по горизонтали; множитель ослабления зависит от частоты и т.д. Сюда же следует отнести и факты регистрации длительных и больших отклонений горизонтальных углов прихода, появление двойных диаграмм направленности [4].

Цель работы

Показать, что характеристики принимаемых при ДТР радиосигналов объясняются в рамках простой модели распространения волн за радиогоризонт при их френелевском отражении от атмосферных мезомасштабных неоднородностей, имеющих элементы квазиплоских поверхностей, способных переотражать радиоволны.

Решаемые задачи

Выявление возможного механизма дальнего тропосферного распространения УКВ, способного объяснить в достаточной мере всю совокупность экспериментальных фактов, зарегистрированных при изучении этого явления.

Моделирование медленных флуктуаций угла прихода за радиогоризонтом

Расчеты проводятся на основе модели распространения за радиогоризонт при френелевском отражении волн от атмосферных мезомасштабных неоднородностей, имеющих квазиплоские поверхности, которые рассматриваются как слои с произвольным наклоном и произвольной ориентацией в пространстве. Исследование выполнено в соответствии с предложенным в работе [5] вариантом оценки величины углов прихода в зависимости от наклона и ориентации отражающей поверхности; при этом были использованы как взятые из литературы [5] данные о наклонных слоистых неоднородностях, так и подобран ряд параметров их вертикальной структуры [6].

Так как рассматриваются отражения от слоев соизмеримых по величине с зонами Френеля в пределах объема рассеяния, их эволюция происходит за периоды времени от нескольких минут до нескольких часов. Характеристики отраженных сигналов (например, угол прихода) меняются на таких же временных интервалах. Описание модели для компьютерного исследования характеристик медленных флуктуаций углов прихода при ДТР приведено в [6]. В работе представлены результаты расчета дистанционной зависимости СКО азимутальных углов прихода; результаты расчета хорошо согласованы с экспериментальными данными. Сделана оценка влияния параметров профиля отражающих неоднородностей на зависимость СКО азимутального угла от дальности. Дана оценка диапазона изменений угла прихода от величины эквивалентного радиуса Земли.

Ниже приводятся результаты следующего этапа модельных исследований характеристик УКВ сигналов за радиогоризонтом при отражении от произвольно наклоненных слоев. Модель позволяет получить зависимость величины СКО медленных флуктуаций углов прихода от ширины диаграммы направленности (ДН) антенны. На рис. 1 представлена зависимость СКО флуктуаций азимутальных углов при изменении ширины ДН узконаправленной передающей антенны и при приеме на антенну с широкой диаграммой. Расчет выполнен для $R_{\text{эКВ}} = 250$ км при трех значениях среднеквадратических величин наклона слоев σ_{β} .

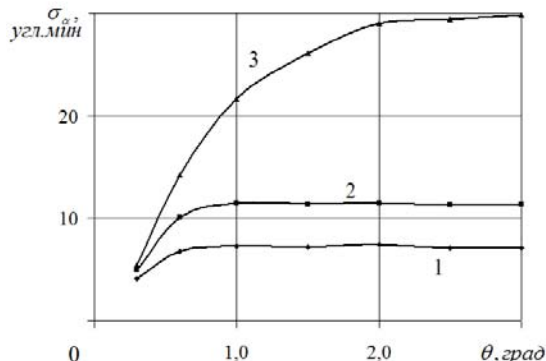


Рис. 1. Зависимость σ_{α} от ширины диаграммы направленности передатчика при разных наклонах отражающих слоев: 1– $\sigma_{\beta}=7^{\circ}$; 2– $\sigma_{\beta}=10^{\circ}$; 3– $\sigma_{\beta}=30^{\circ}$

Из рисунка следует вывод, что при приёме сигналов, отраженных от наклонных слоев, существует зависимость величины флуктуаций от направленности антенн, но рост СКО флуктуаций азимутального угла прихода σ_{α} ограничен предельными величинами, определяемыми соотношением между значениями σ_{β} и шириной ДН антенны θ .

Как показывают другие опыты (рис. 2), величина флуктуаций углов прихода и в горизонтальной, и в вертикальной плоскостях зависят от величины наклона отражающих слоев, но вид этих зависимостей заметно различается. При росте σ_{β} от нуля до 15° интенсивность флуктуаций в вертикальной плоскости σ_{μ} возрастает достаточно быстро, а затем остается почти на одном уровне. Можно видеть, что $\sigma_{\mu}(\sigma_{\beta})$ мало зависит от ширины ДН (для сравнения взяты величины ДН равные $0,7^{\circ}$ и $3,5^{\circ}$). В отличие от вертикальной, горизонтальная составляющая угла прихода растет гораздо медленнее. Величина σ_{α} при узкой

диаграмме ($\theta=0,7^\circ$) растет по мере увеличения σ_β , затем рост замедляется, а при $\sigma_\beta \approx 25^\circ$ доходит практически до насыщения. При $\theta=3,5^\circ$ насыщение не достигается даже при максимальной величине углов наклона слоев.

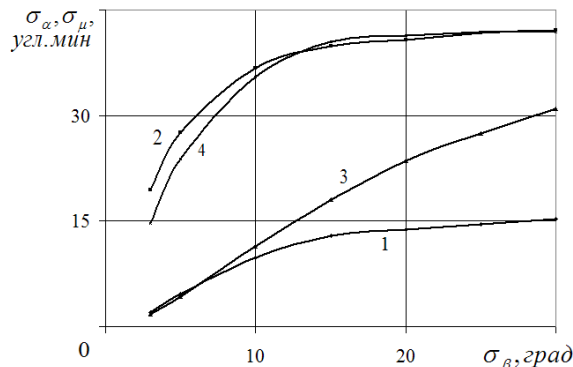


Рис. 2. Зависимость величины флуктуаций углов прихода от наклона слоёв при разных ДН:
1– σ_α при ДН=0,7°; 2– σ_μ при ДН=0,7°; 3– σ_α при ДН=3,5°; 4– σ_μ при ДН=3,5°

Данные рис. 3 дают представление о соотношении ширины угловых спектров по вертикали и по горизонтали. Эксперименты показывают [3], что ширина спектра по вертикали в 1,5-2 раза больше, чем по горизонтали. Превышения величины вертикальных флуктуаций над горизонтальными зафиксированы для всех серий численных экспериментов. Но количественная характеристика соотношения (по вертикали в 1,5-2 раза больше) наблюдалась при условиях опытов, когда $\sigma_\beta \geq 20^\circ$, $\theta=3,5^\circ$. Закономерности изменений величин σ_α и σ_μ ,

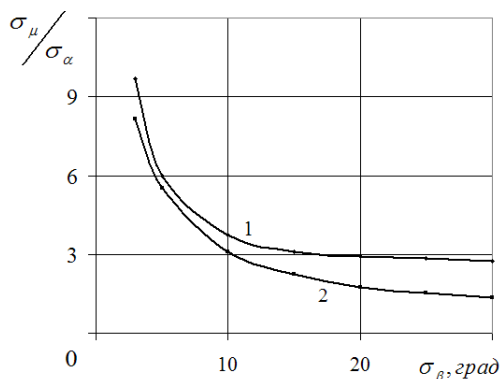


Рис. 3. Соотношение ширины углового спектра по вертикали и горизонтали в зависимости от величины наклона слоёв: 1– при ДН=0,7°; 2– при ДН=3,5°

зарегистрированные в опытах, объясняются исходя из геометрии отражения от наклонного слоя. Механизм формирования флуктуаций в вертикальной плоскости мало зависит от пространственного положения слоя и его наклона, ибо определяется, в основном, изменением высоты над земной поверхностью. Величина горизонтального отклонения угла прихода прямо зависит и от наклона слоя, и от величины его удаления от плоскости большого круга. И, естественно, чем шире диаграмма направленности, тем большая величина σ_α будет зафиксирована в эксперименте, но при условии наличия слоя с требуемой величиной наклона.

Интерпретация результатов и их анализ

Представленные результаты компьютерных экспериментов показывают, что модельные закономерности флуктуаций углов прихода, полученные в предположении о приеме за радиогоризонтом сигналов, отраженных от наклонных слоев, совпадают с известными экспериментальными данными (дистанционная зависимость, наличие влияния ширины диаграммы направленности на величину флуктуаций; соотношение угловых спектров вертикальной и горизонтальной составляющих флуктуаций; наличие двух видов тропосферных

неоднородностей, определяющих два временных интервала корреляций медленных флуктуаций сигналов ДТР), полученными при проведении опытов на трассах ДТР.

В исследованиях уровня сигналов установлено [4], что законы распределения быстрых флуктуаций в большей части случаев соответствуют механизму, когда «существенную роль в образовании поля ДТР УКВ играет лишь небольшое количество компонент сигнала, переизлученных немногими неоднородностями, попавшими в объем переизлучения» [3], т.е. переизлученные несколькими слоями. Известно также, что средний уровень сигнала, рассчитанный при отражении от слоёв, удовлетворительно совпадает с экспериментальными результатами при учете как наклонных, так и горизонтальных неоднородностей [4, 7].

Отметим еще два зарегистрированных эффекта [4], указывающих на наличие существенной роли отражений от неоднородностей с большим наклоном. Во-первых, это регистрация очень больших выбросов горизонтальных углов прихода, когда наблюдались «плавные отклонения «средних» значений угла ... до 5°». Во-вторых, регистрация случаев, когда ДН «раздваивается почти на равные части». Такие явления объясняются в самом источнике этих сведений, если принять как факт наличие отражений от существующих в стороне от плоскости большого круга сильно наклоненных интенсивных тропосферных неоднородностей. Действительно, в первом случае «особенно заметны эти явления при измерениях на трассе короче 390 км в марте-апреле», т.е. когда между отдельными участками земной поверхности за счет разного нагрева возникают мощные вертикальные потоки воздуха с большим контрастом коэффициента преломления, формирующие интенсивные мезомасштабные неоднородности с отражающими поверхностями. Так возникают «очень большие выбросы углов прихода». Второй эффект также связан с приведенными выше объяснениями, когда возникают две отражающие неоднородности, для которых в течение некоторого времени выполняются условия прихода отраженного луча в точку приема.

Выводы

Представленная работа даёт объяснение сопряженным с ДТР фактам, ранее не объясненным известными теориями. Полученные модельные результаты дают хорошее качественное объяснение экспериментальным данным. Для проведения количественного сопоставления результатов моделирования и опытных данных требуется расширить наши знания о параметрах рассматриваемых неоднородностей атмосферы, их статических и динамических свойствах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батуева Е.В., Дарижапов Д.Д. Корреляция уровня широкополосного сигнала ДТР и радиометеорологических параметров. – РЭ, том 53, № 7, 2008, с. 831-834.
2. Бычков Д. Модернизация систем связи береговой охраны Латвии на основе дальнего тропосферного рассеивания. [Электронный ресурс] // Research and technology – step into the future. – 2008, v. 3, No 2., с. 35. – Режим доступа: http://www.tsi.lv/ResTech/2008/v3-2/vol3_N2-section2.pdf
3. Калинин А.И., Троицкий В.Н., Шур А.А. Исследования дальнего тропосферного распространения УКВ. Сб. Распространение радиоволн. – М., «Наука», 1975, с. 127-153
4. Дальнее тропосферное распространение ультракоротких волн / Под ред. Б.А. Введенского, М.А. Колосова, А.И. Калинина, Я.С. Шифрина. – М.: Сов. радио, 1965. – 416 с.
5. Gossard E.E. The reflection of microwaves by a refractive layer perturbed by waves // IRE trans AP. – 1962, May. – P. 317-325.
6. Киселев О.Н. Модель медленных флуктуаций угла прихода УКВ за радиогоризонтом. Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн» РРВ-22. Г. Ростов-на-Дону – п. Лоо, 22-26 сентября 2008 г. Т. 1. Ростов-на-Дону:- Изд. СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. 2008, с. 246-249.
7. Friis H.T., Crawford A.B., Hogg D.C. A reflection theory for propagation beyond the horizon. Bell. Syst. Techn. J., 1957, v. 36, p. 627-644.

ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ РАДИОВОЛН ЧАСТОТОЙ 9 ГГц НА ЗАКРЫТЫХ ТРАССАХ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ В ВИДЕ ЛЕСА

М.В. КРУТИКОВ, А.А. МЕЩЕРЯКОВ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
НИИ «Радиотехнических систем»,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40,
E-mail: rwplab@ms.tusur.ru*

Исследована деполяризация радиоизлучения на частоте 9 ГГц при его прохождении на наземных закрытых трассах различной протяженности с препятствиями в виде леса. Представлены экспериментальные оценки отношения ортогональных компонент принимаемого поля при излучении вертикальной и горизонтальной поляризации сигнала.

RADIOWAVE DEPOLARISATION ON DIFFRACTION FOREST PATHS AT 9 GHz

M.V. KRUTIKOV, A.A. MESCHERYAKOV

This paper investigates the performance of depolarization vertical and horizontal radio waves on diffraction radio paths. The experimental dates for several paths is used to evaluate radio waves crosspolarization by obstacle at forest end.

Введение

Известно, что при прохождении радиоволн над поросшей лесом пересеченной местностью происходит существенное изменение поляризации излученной радиоволны. Указанный эффект подробно исследован для случая прямой видимости обоих концов радиотрассы, как это бывает на радиорелейных линиях связи [1]. На закрытых трассах деполяризация излученной радиоволны может существенно усиливаться, как это показано в работах [2-4] для радиоволн с частотами до 3 ГГц. Причиной увеличенной деполяризации поля является взаимодействие радиоволн с лесным покровом на трассе распространения.

Цель работы

Оценка степени влияния радиотрасс различной протяженности, проходящих над местностью, покрытой преимущественно лиственным лесом, на состояние поляризации принимаемой радиоволны при расположении источника радиоизлучения частотой 9 ГГц вне прямой видимости приемного пункта, за препятствиями.

Эксперимент и интерпретация полученных данных

Оценка состояния поляризации проводилась по данным, полученным в ходе экспериментальных исследований характеристик радиоволн на наземных трассах различной протяженности.

В исследованиях использовалась многоканальная приемная установка, подробно описанная в [5]. Установка содержала антенную систему, состоявшую из двух горизонтальных линейных решеток, одна из которых обеспечивала прием вертикальной составляющей, другая – прием горизонтальной составляющей поля. Рупорные элементы решеток имели коэффициент усиления 20 дБ с уровнем кроссполяризованного приема не более –35 дБ (при приеме вдоль оптической оси). В качестве источника радиоизлучения использовалась радиолокационная станция с сигналом без внутриимпульсной модуляции мощностью 100 кВт в импульсе и параболической зеркальной антенной с шириной луча 3 градуса с низким уровнем паразитной поляризации (–30 и более дБ).

В ходе измерений антенны источника излучения и приемной установки были взаимно наведены друг на друга для получения максимального сигнала основной поляризации.

Исследованные трассы имели протяженность D до 42 км и были ориентированы примерно в одном направлении относительно приемной позиции. Источник радиоизлучения устанавливался на лесных полянах. На каждой поляне было выбрано несколько (обычно 5) позиций, располагавшихся на линиях поперечных основному направлению трассы на расстояниях от границы леса от 800 до 3000 м. Высота деревьев в лесу варьировалась в интервале 20-25 м.

Исследования выполнялись в сентябре 2010 г. в течение двух недель, во время которых погодные условия изменялись незначительно.

Источник радиоизлучения работал либо на вертикальной, либо на горизонтальной поляризации. Запись сигналов в приемном пункте выполнялась сеансами длительностью 20 секунд. По записанным реализациям оценивались среднее значение и СКО амплитуды принимаемого сигнала в приемных каналах, ортогональных по поляризации.

Деполаризация оценивалась по вариациям коэффициента преобразования поляризации [3] $q = E_{кр} / E_{осн}$, где $E_{осн}$, $E_{кр}$ - средние значения амплитуды принимаемых сигналов на выходах антенн основной поляризации и кроссполаризации, соответственно.

При расчетах q использовались измерения напряжений на выходах антенных элементов вертикальной и горизонтальной поляризации, размещенных вблизи друг друга, что позволяло считать, что с относительно небольшой погрешностью оцениваются параметры поля.

Погрешность оценки за счет различий в коэффициенте усиления антенн вертикальной и горизонтальной поляризации не превышала 1 дБ.

Средние значения оценок q принимаемого поля приведены на рис. 1 и 2 для вертикально и горизонтально поляризованных излученных полей. Соответствующие оценки временных флуктуаций σ_q на различных трассах даны на рис. 3 и 4. Зависимость величины q от расстояния между источником излучения и препятствием в виде границы леса приведены на рис. 5 и 6. Каждая точка перечисленных рисунков соответствует отдельной трассе.

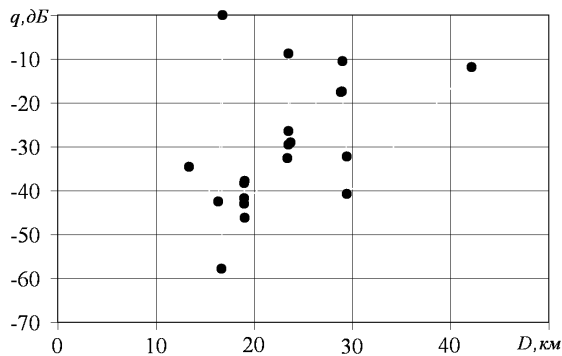


Рис. 1. Коэффициент преобразования поляризации принимаемых сигналов на наземных трассах различной протяженности. Вертикальная поляризация излучения. Частота 9200 МГц

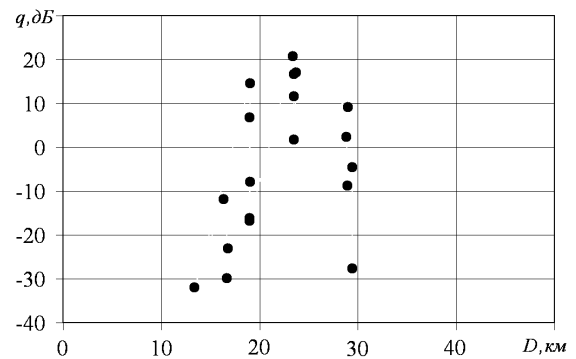


Рис. 2. Коэффициент преобразования поляризации принимаемых сигналов на наземных трассах различной протяженности. Горизонтальная поляризация излучения. Частота 9200 МГц

Полученные результаты показывают существенное изменение q как при вертикальной, так и при горизонтальной поляризации излучения. При вертикальной поляризации величина q изменяется от значений, соответствующих исходной поляризационной структуре излученного поля, до величин, близких к нулю дБ, т.е. когда амплитуды сигналов вертикальной и горизонтальной поляризации равны. Более значительные изменения q наблюдаются при горизонтальной поляризации излучения, при которой значения q могут быть + 20 дБ, т.е. вместо волны горизонтальной поляризации приходит волна, практически ортогональная излученной, а именно вертикально поляризованная. Кроме того, при горизонтальной поляризации излучения наблюдается явный максимум q для трасс протяженностью примерно 23 км. Характерно, что полученные в ходе исследований значения q превышают указанные

в [4] величины, и подтверждают тенденции, отмеченные в работе [6], к увеличению доли вертикальной составляющей поля по сравнению с горизонтальной при увеличении частоты сигнала.

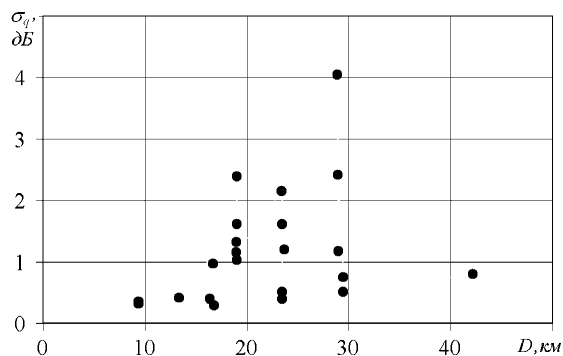


Рис. 3. СКО коэффициента преобразования поляризации принимаемых сигналов на наземных трассах различной протяженности. Вертикальная поляризация излучения. Частота 9200 МГц

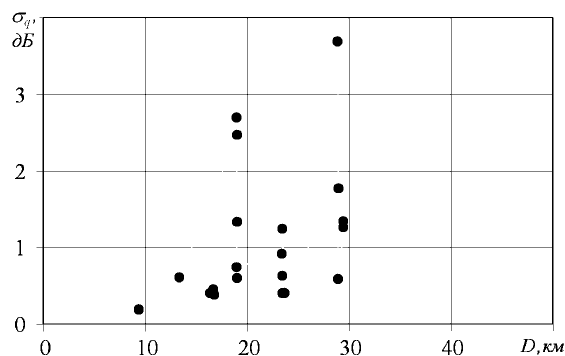


Рис. 4. СКО коэффициента преобразования поляризации принимаемых сигналов на наземных трассах различной протяженности. Горизонтальная поляризация излучения. Частота 9200 МГц

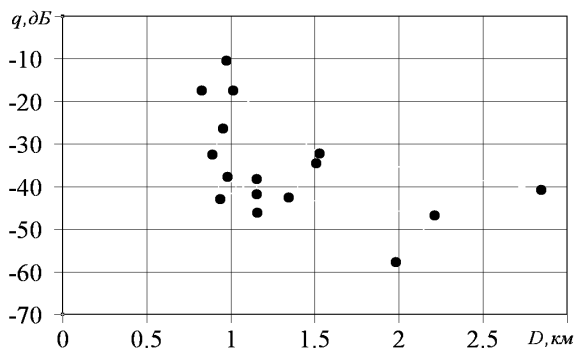


Рис. 5. Коэффициент преобразования поляризации принимаемых сигналов на различных расстояниях между источником излучения и препятствием. Вертикальная поляризация излучения. Частота 9200 МГц

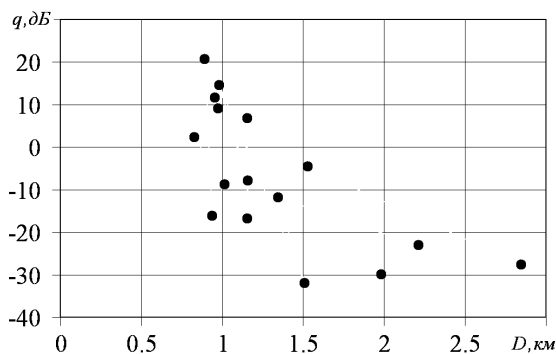


Рис. 6. Коэффициент преобразования поляризации принимаемых сигналов на различных расстояниях между источником излучения и препятствием. Горизонтальная поляризация излучения. Частота 9200 МГц

Из рис.1 и 2 следует также, что помимо изменений величины q с увеличением протяженности трассы наблюдается значительный (20-40 дБ) разброс q при перемещении передатчика поперек трассы.

Временные флуктуации величины q , как показывают рис. 3 и 4, увеличиваются с протяженностью трасс, достигая величин 3-4 дБ при любой поляризации излучения.

Зависимость величины q от расстояния между источником радиоизлучения и кромкой леса в направлении на приемный пункт указывают на тенденцию к уменьшению коэффициента преобразования поляризации с удалением от препятствия для радиоволн обеих излучаемых поляризаций. Наибольший разброс значений коэффициента преобразования поляризации наблюдается при более близком расположении источника радиоизлучения к препятствиям.

Наличие в экспериментальных данных значений q , меньших по величине тех, что могут обеспечить поляризационные характеристики используемых антенн, можно объяснить наличием глубокой интерференции в месте расположения приемных антенн. Указанный эффект наблюдается также и в данных работы [4].

Выводы

1. Наблюдается существенная разница в поведении радиоволн различной поляризации при распространении на трассах, проходящих над земной поверхностью, поросшей смешанным

- лесом, имеющим значительные по площади поляны. Основная особенность поведения поляризации на трассе заключается в том, что волны вертикальной поляризации деполяризуются в меньшей степени в сравнении с волнами горизонтальной поляризации.
2. Дистанционная зависимость коэффициента преобразования поляризации вертикально поляризованной волны проявляется в увеличении уровня кросскомпонента от фонового значения, характерного для зоны прямой видимости, до уровня (-10 – 0) дБ на трассах протяженностью до 30 км
 3. Дистанционная зависимость коэффициента преобразования поляризации горизонтально поляризованной волны имеет максимум в области протяженности трасс 22-23 км, где уровень кросскомпонента достигает величины +20 дБ.
 4. Состояние поляризации радиоволн на трассах равной протяженности подвергается значительным изменениям в зависимости от выбранной позиции источника излучения. Отмечен разброс коэффициента преобразования поляризации в интервале 50 дБ на трассе 29 км как для вертикальной, так и горизонтальной поляризации излучения. Временная изменчивость коэффициента преобразования поляризации составляла 3-4 дБ (СКО) при максимальной протяженности трассы.
 5. Выбор позиции по отношению к препятствию влияет на коэффициент преобразования поляризации. Приближение к препятствию увеличивает как величину этого коэффициента, так и разброс его значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Надененко Л.В., Святогор В.В. Исследование деполяризации радиоволн на РРЛ прямой видимости, *Электросвязь*, №11, 1981, с. 37-41.
2. Шур А.А., Мельников Б.Ф. Особенности распространения вертикально поляризованных волн в сети ТВ вещания, *Электросвязь*, №7, 1979, с. 5-7.
3. Слюсарчук В.Ф. Экспериментальное исследование поляризации радиоволн сантиметрового диапазона при распространении вблизи земли за радиогоризонт // Доклады межведомственного совещания по вопросам поляризационной структуры радиосигналов (краткое содержание). Томск, изд. ТГУ, 1968, 32 с.
4. Дагуров П.Н., Заяханов А.С., Цибиков А.Е., Чимитдоржиев Н.Б. Исследование искажений поляризационных параметров дифракционного поля сантиметровых волн // *Электросвязь*. - 1988, №12.- с. 49-52.
5. Ровкин М.Е., Крутиков М.В., Мещеряков В.А., Зайцев В.А., Бутырин Е.А. Измерительный комплекс для исследования пространственно-временных искажений радиосигналов трехсантиметрового диапазона на наземных трассах. *Известия вузов России, Радиоэлектроника*, № 6, 2006, с. 7-11.
6. Абарыков В.Н., Батороев А.С. Учет поляризационных особенностей поля УКВ на закрытых трассах, XXII Всероссийская научная конференция « распространение радиоволн» РРВ-22. г. Ростов-на Дону- п. Лоо, 22-26 сентября 2008 года, Труды симпозиума. Том I- Ростов-на-Дону: изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008, 326 с.

ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА И ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ В КАНАЛАХ С МНОГОЛУЧЕВОСТЬЮ СПЕКТРАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

В.И.ЛУЦЕНКО¹, И.В.ЛУЦЕНКО¹, В.Н.ГУДКОВ², Н.С.АНЬ³

¹ *Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова,
Украина, 61085, г. Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12,
E-mail: lutsenko@ire.kharkov.ua, irene-lutsenko@ukr.net,*

² *ООО «Навис – Украина», Украина,
20708, Смела, ул. Мазура, 24 E-mail: vgood@orizon-navigation.com,*

³ *Институт геофизики Вьетнамской академии науки и технологии, А8,
18 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam, E-mail: nxuananh@yahoo.com*

Рассмотрена возможность использования методов спектрального оценивания для определения количества источников сигналов, их угловых координат и времени существования в каналах с многолучевостью. Предлагаемый подход может использоваться для анализа механизмов распространения сигналов на морских трассах, в тропосферных каналах связи и на трассах ИСЗ–Земля. Приведены вероятностные характеристики существования диффузно отражающих точек на морской поверхности, скорости перемещения инверсионных слоев, количества отражающих точек на земной поверхности.

V.I. LUTSENKO, I.V. LUTSENKO, V.N.GUDKOV, N.X. ANH

Possibility of usage of the spectral estimation methods for determination of the signal sources number, their angular coordinates and time of existence for the multipath channels is considered. The proposed approach could be used for analyze of the signal propagation mechanism at the sea paths, in the troposphere communication channels and on the paths from satellite to the Earth. Probability characteristics of existence of diffusely reflecting points on the sea surface, speed of moving of the inversion layers, number of reflecting points on the earth's surface are showed.

Введение

Изучение вертикальной структуры электромагнитного поля на приводных трассах, а также в зоне ближней геометрической тени широко используется для выяснения механизмов распространения радиоволн [1-5], связанных с многолучевостью в канале распространения и обусловленных отражением от поверхности раздела и тропосферной рефракцией. Одним источником многолучевости является наличие приподнятых инверсионных слоев [6]. При приеме радиосигналов УКВ-диапазона в зоне тени в условиях спокойной атмосферы наблюдаются суточные изменения уровня принимаемого сигнала после захода и несколько позже восхода Солнца, связанные с изменением рефракционных свойств тропосферы. Вместе с тем, в весенне-осенний период наблюдаются интерференционные явления с глубокими замираниями (до 40 дБ), связанные с наличием приподнятых инверсионных слоев и обусловленной этим многолучевостью в канале распространения [7]. Интерференционные замирания, наблюдаемые при приеме сигналов ИСЗ, также обусловлены наличием в точке приема кроме прямого сигнала и сигнала отраженного от поверхности раздела [8, 9].

В настоящей работе рассмотрена возможность использования спектральных методов оценивания для анализа количества и параметров источников сигналов в каналах с многолучевостью.

Метод оценки количества и параметров сигналов

Сигнал в точке приема при наличии многолучевости в канале распространения может быть записан в виде суммы гармонических компонент: Множитель ослабления сигнала V в точке приема при малых углах визирования источника $\theta \approx \sin \theta$ представим в виде:

$$V(\theta) = \left| 1 + \sum_{j=1}^m \rho_j \exp(i2\pi\chi_j \sin \theta) \right|, \quad (1)$$

где ρ_j комплексный коэффициент отражения - характеризует величину сигнала от дополнительного источника по отношению к прямому сигналу, $\chi_j = 2h_j/\lambda$ - угловая частота, определяемая набегом фазы $\varphi_j = 2\pi\chi_j \sin \theta$ от j отражающей точки, располагающейся на высоте h_j относительно приемника, а N_0 коэффициент преломления атмосферы в месте измерения. Из соотношения (1) видно, что изменение угла визирования источника θ , которое наблюдается при вертикальных разрезах поля над поверхностью раздела, перемещении ИСЗ системы глобальной навигации, а также высоты расположения инверсионных отражающих слоев в тропосфере в спектре флуктуаций множителя ослабления появляются компоненты, частота которых связана с угловым положением источника. Это означает, что используя спектральный анализ можно по частоте компоненты определить угловое положение источника, а по ее интенсивности – коэффициент отражения. В качестве отражающих точек могут выступать приподнятые инверсионные слои тропосферы или блестящие точки на земной поверхности. Из соотношения (1) видно, что наличие дополнительных, кроме зеркального, отражений приводит к обогащению спектра частотами $\chi_j = h_j/\lambda$ и их комбинациями $\chi_j - \chi_l$. Следует отметить, что если высота приемника относительно отражающей точки на поверхности h_j , или инверсионного слоя тропосферы превышает высоту приемника относительно среднего уровня земной поверхности h_0 , то частоты $\chi_j \geq \chi_0$ выше, чем соответствующие точке зеркального отражения. В противном случае они имеют более низкие частоты $\chi_j \leq \chi_0$. Спектральное разложение амплитуды принимаемого сигнала может использоваться для оценки количества точек отражения и их характеристик: угловых координат и коэффициентов отражения с использованием подходов, разработанных в [4].

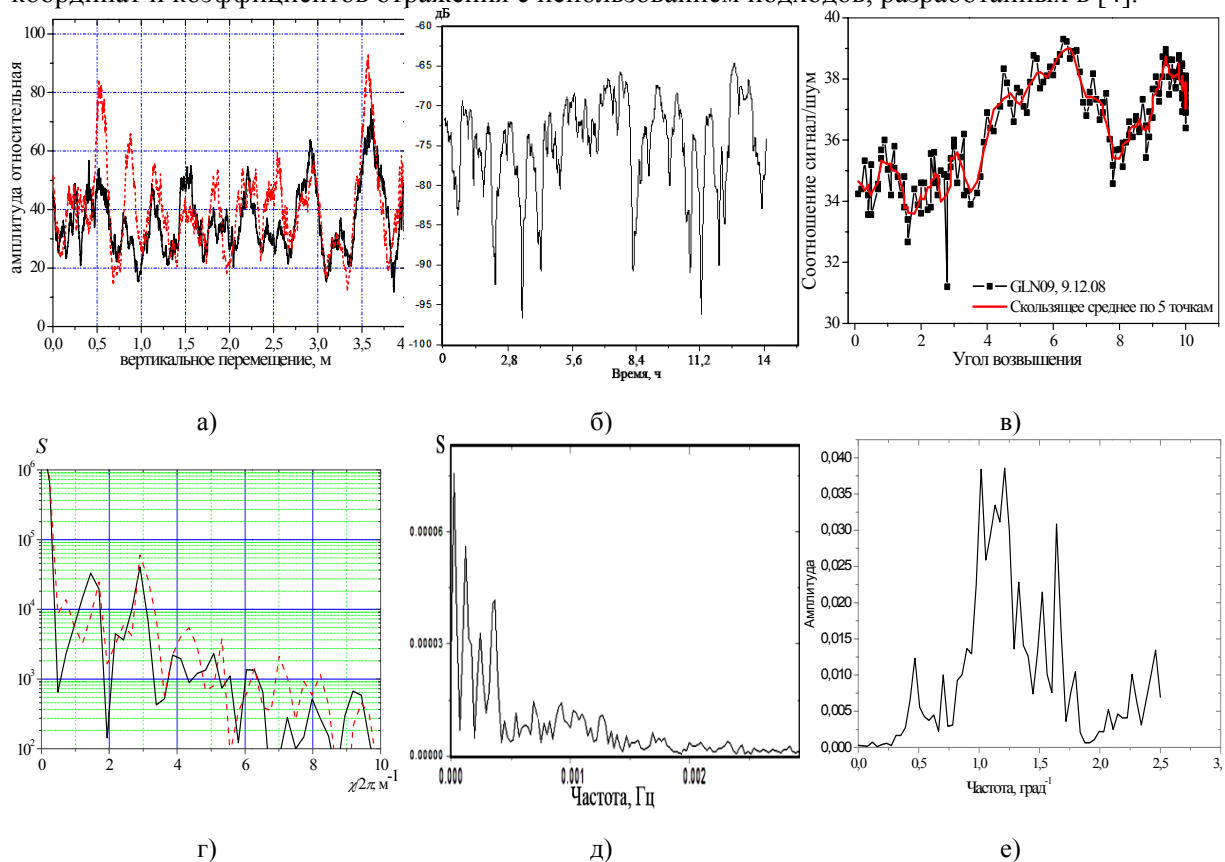


Рис.1. Сигналы и их спектры в каналах с многолучевостью: а - вертикальные разрезы поля на волне 4 мм над морем с интервалом 2 мин, г – их пространственные спектры; б - множитель ослабления поля на загоризонтной трассе длиной 71 км на частоте 175 МГц – д – его временной спектр; в – уровень сигнала от угла возвышения ИСЗ системы GPS (частота 1575 МГц.) и его угловой спектр - е

На рис. 1 в качестве примера показаны записи: вертикального разреза поля на волне 4мм на морской трассе - рис. 1, а, множителя ослабления сигнала УКВ (175 МГц) на загоризонтной трассе при наличии приподнятых инверсионных слоев - рис. 1, б и радиозаход навигационного спутника системы GPS (частота около 1500 МГц) - рис. 1, в. Для приведенного примера характерно наличие гармонических осцилляций сигнала, обусловленных интерференционными явлениями в канале распространения радиоволн для изучения которых можно использовать методы спектрального оценивания. На рис. 1 г, д, е приведены спектры: пространственный – рис. 1 г для вертикального разреза поля, временной – рис. 1 д, полученный при перемещении инверсионных слоев и угловой – рис. 1 е – при перемещении ИСЗ системы GPS. Для определения количества источников сигналов (диффузно отражающих точек на морской – рис. 1 а, г или земной – рис. 1 в, е поверхностях, инверсионных отражающих слоев в тропосфере – рис. 1 б, д) осуществляется вычисление корреляционной функции временной реализации квадрата сигнала (или множителя ослабления $|V|^2$) и его спектр. Сопоставляя уровни спектральной плотности с пороговым значением на 3...6 дБ, превышающим средний уровень, определяется общее количество компонент спектра m , используемое при дальнейшем анализе. После ранжирования спектральных отсчетов S_i в порядке убывания от S_1 до S_m осуществляется последовательная проверка гипотез о наличии $k=1...N$ -спектральных компонент, обусловленных $p=1...L$ инверсионными слоями. На каждом из этапов в предположении, что количество компонент $k=l$, осуществляется вычисление остаточных дисперсий

$$\sigma^2_{Ocm}(k=l) = \frac{1}{m-l} \sum_{i=1}^m S_i^2, \quad (2)$$

которые сопоставляются с использованием критерия Фишера $F(\nu_1, \nu_2)$ [10]

$$\frac{\sigma^2_{Ocm}(k=l)}{\sigma^2_{Ocm}(k=l-1)} \geq \frac{F(\nu_1 = m-1, \nu_2 = m-l)}{F(\nu_1 = m-1, \nu_2 = m-l+1)}. \quad (3)$$

для определения значимости гипотезы $k=l$. После определения числа значимых спектральных компонент $k=N$ с использованием соотношений (1), (2), определяются частоты флуктуаций сигналов от различных слоев и их количество $L - N = L(L+1)/2$. Так, отношении ширины спектральной линии конкретной диффузно отражающей точки, например на морской поверхности, к получаемому пространственному разрешению будет характеризовать вероятность ее существования все время вертикального разреза поля, а зная время его осуществления можно оценить и время ее «жизни». Полученные результаты представлены на рис.2.

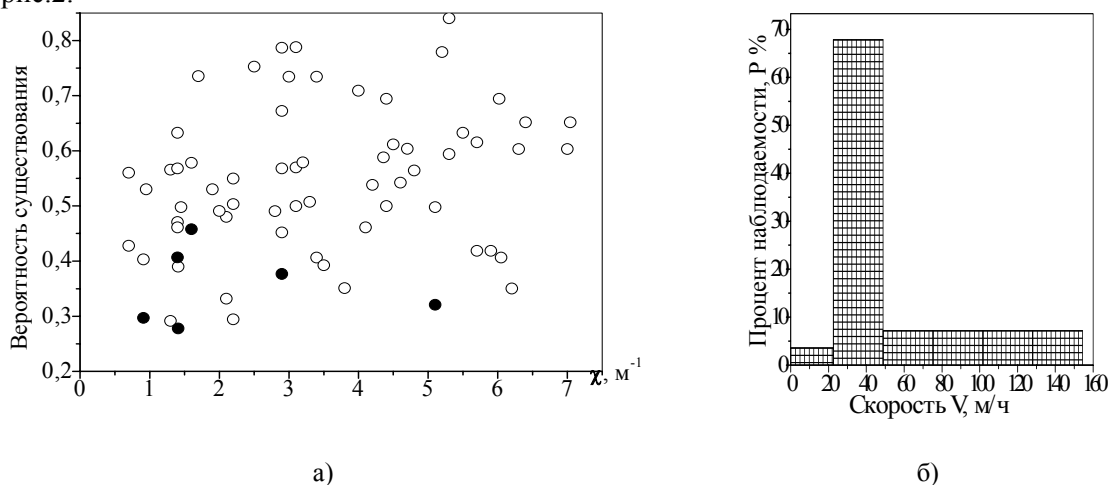


Рис. 2. Вероятностные характеристики существования диффузно отражающих точек на морской поверхности и распределение скорости перемещения инверсионных слоев

Следует отметить, что в нашем эксперименте спектральная компонента точки зеркального отражения соответствовала $\chi \approx 3\text{м}^{-1}$. Видно, что диффузно отражающие точки располагались, как ближе к РЛС (частоты меньше чем для точки зеркального отражения) так и дальше (большие частоты), причем с учетом времени разреза составлявшем около 2 сек время их «жизни», как правило, не превышало 1,5 сек.

Выводы

Рассмотрена возможность использования спектрального оценивания для определения источников сигналов в каналах с многолучевостью. Методика использована для исследования вертикальной структуры поля, с помощью наклонно перемещающегося эталонного уголкового отражателя. Анализ спектрального состава рассеянного уголком сигнала позволил установить, что в пределах области, формирующей рассеянный сигнал, одновременно существует сравнительно небольшое количество блестящих точек с временами жизни не превышающими единиц секунд.

Рассмотрены интерференционные явления в загоризонтном канале распространения УКВ при наличии инверсионных слоев. Предложена методика определения количества инверсионных слоев и их характеристик (коэффициентов отражения и скорости изменения их высоты). Установлено, что более чем 50% случаев скорости их перемещения не превышают 80 м/час при количестве слоев не более 2.

Установлено, что при стандартной рефракции и наличии нескольких точек отражения (как правило, не более 3) наблюдается интерференционная структура принимаемого сигнала ИСЗ системы GPS с провалами, в которой доминирует несколько частот, вблизи частоты, соответствующей точке зеркального отражения. Возрастание рефракции в поверхностном слое тропосферы приводит к смещению интерференционных лепестков структуры поля при сохранении общего количества источников (отражающих точек). Это проявляется в появлении фазового запаздывания между спектральными компонентами, которое можно измерять по взаимным спектрам или сдвигам взаимно корреляционной функции. Наличие приподнятых инверсионных слоев приводит к появлению в принимаемом сигнале дополнительных частот. Они появляются и пропадают под некоторыми углами, при которых происходит высвечивание сигнала слоем или его захват. Это проявляется в немонотонном характере изменения усредненной по нескольким интерференционным лепесткам интенсивности принятого от ИСЗ сигнала, с появлением так называемых «радиоям».

ЛИТЕРАТУРА

1. Введенский Б.А. Основы теории распространения радиоволн.- М.: Гос. техн.-теорет. изд-во, 1934.- 367 с.
2. Разказовский В.Б., Балан М.Г., Беспечный С.Б., Горбач Н.В., Педенко Ю.А. Статистические характеристики поля сантиметровых и миллиметровых волн над поверхностью моря // Изв. вузов. Радиофизика. - 1982. - Т. 25., №11. - С.1260-1268.
3. Луценко В.И., Педенко Ю.А., Разказовский В.Б. Экспериментальное исследование диффузных переотражений от моря в миллиметровом диапазоне волн // 5 Всесоюзн. конф. по распространению радиоволн, Алма – Ата, (октябрь 1987 г.): Тез. докл.: - М.: Наука, 1987. – 279 с.
4. Разказовский В.Б., Педенко Ю.А. Многолучевое распространение над морем // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи совр. радиоэл. - 1996.- № 7. - С.29-39.
5. Луценко В.И., Луценко И.В., Попов И.В. Изучение структуры поля миллиметровых волн на приводных трассах с использованием РЛС и перемещающегося уголкового отражателя // International Crimea Microwave Conference, Ukraine, Sevastopol', 2005, - P. 917-918.
6. Белов Е.Н., Луценко В.И., Луценко И.В., Хоменко С.И. Оценка тропосферной рефракции по множителю ослабления радиоволн при распространении на приземных загоризонтных трассах.// Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон.-2004.-Т.9, №1. -С. 248-258.

7. Луценко И.В., Луценко В.И. Об определении характеристик отражающих слоев тропосферы по изменению интенсивности радиоволн на приземных загоризонтных трассах распространения с использованием метода обнаружения-разрешения неизвестного количества сигналов // Международный радиофорум МРФ 2005 «Международная конференция по системам локации и навигации (МКСЛН-2005)» «Дистанционное зондирование атмосферы и поверхности Земли», Харьков, 19-23 сентября 2005.-Т2.- С. 417-420.
8. Богатуров А.Н., Гайкович К.П., Гурвич А.С. и др. О возможности определения отражающих слоев в тропосфере над морем по вариациям уровня радиосигналов ИСЗ // ДАН СССР.- 1990.- Т.315, №4.- С.830-834.
9. Азизов А.А., Гайкович К.П., Кашкаров С.С., Черняева М.Б. Использование сигналов навигационных ИСЗ для определения параметров атмосферы // Изв. Вуз-ов, Радиофизика.- 1998.- Т.41, №9.- С.1093-1116.
10. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул.- М.:Высш. школа, 1982.- 224с.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ
В ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧКЕ ПРОСТРАНСТВА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ В ОПРЕДЕЛЕННЫМ ОБРАЗОМ
ВЫБРАННЫХ ОПОРНЫХ ПУНКТАХ**

В.И. ЛУЦЕНКО¹, И.В. ЛУЦЕНКО¹, О.В. СЫТНИК¹, В.Н. ГУДКОВ², Н.С. АНЬ³

¹ *Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова,*

Украина, 61085, г. Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12,

E-mail: lutsenko@ire.kharkov.ua, irene-lutsenko@ukr.net, ssvp11@ire.kharkov.ua

² *ООО «Навис – Украина»,*

Украина, 20708, Смела, ул. Мазура, 24, E-mail: vgood@orizon-navigation.com

³ *Институт геофизики Вьетнамской академии науки и технологии,*

A8, 18 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam, E-mail: nxuananh@yahoo.com

Рассмотрена возможность использования стандартных данных метеоцентров для прогнозирования коэффициента преломления тропосферы в заданной точке пространства. Получены соотношения для прогноза значений коэффициентов преломления в заданной точке пространства. Предложенный метод может использоваться в системе навигационно-космического обеспечения страны при введении тропосферных поправок в приемники систем глобальной навигации.

V.I. LUTSENKO, V.I. LUTSENKO, O.V. SYTNIK, V.N. GUDKOV, N.X. ANH

Possibility of usage of standard data of meteorological centers for prediction of the troposphere refraction coefficient at the given point of space is considered. Equations for prediction of refraction coefficient value at the given point of space are obtained. The proposed method could be used in the system of navigation-space assurance of the country by application of troposphere corrections in receivers of the global navigation system.

Введение

В настоящее время для определения местоположения объектов широко применяются системы глобальной навигации. Существует полностью развернутая система США GPS [1]. Россией ведутся интенсивные работы по разворачиванию полной системы спутников системы ГЛОНАС [2]. В Европе заканчивается разработка системы Galileo [3], а в Китае начато разворачивание системы Compass. Различного рода возмущения и неоднородности ионосферы и тропосферы приводят к появлению ошибок измерения координат объектов. Ионосферные ошибки можно в значительной степени компенсировать, используя двухчастотный режим работы навигационного приемника. Поэтому в наибольшей мере влияет на определение координат тропосфера, не учет которой приводит к погрешностям измерения псевдодальностей от двух с половиной (в зените) до двадцати пяти метров (при углах возвышения спутника порядка пяти градусов). Для снижения ошибок измерения местоположения необходим учет влияния тропосферы при обработке информации в системе космического навигационного обеспечения (СКНО) [4]. Возможны два основных режима введения поправок: в реальном времени и после сеансового введения. При обработке в масштабе реального времени предполагается использовать данные метеостанций, входящих в состав контрольно-корректирующих станций (ККС) СКНО. При этом должны обеспечиваться точности определения координат не хуже нескольких метров. При послесеансовой обработке поправки формируются на основании фазовых наблюдений станций сети СКНО. Получаемые ошибки измерения составляют единицы сантиметров. Для аппроксимации тропосферных задержек в реальном времени используют метеорологические параметры, снятые в ряде точек пространства, по которым формируют и предоставляют пользователям параметры функций, аппроксимирующих зависимость температуры, давления и влажности от широты и долготы в пределах территории страны. Кроме того, формируют и предоставляют пользователям параметры функций, аппроксимирующих зависимость зенитной тропосферной задержки от широты и долготы в пределах территории страны. Оба эти подхода опираются на вычисление

тропосферных задержек с использованием данных метеостанций на уровень моря. Методическая погрешность оценки составляет около 2.5%. Проведенный для Украины анализ [4] показал, что порядок аппроксимирующей модели практически не сказывается на ошибке измерения тропосферной задержки и был сделан вывод о возможности использования средних по стране данных по коэффициентам преломления. Вместе с тем, для более крупных, чем Украина стран, например, России, Китая использование усредненных по всей территории значений коэффициента преломления, приводит к неоправданно большим ошибкам. Представляет интерес районирование этого параметра, а также изучение возможности повышения порядка модели, по крайней мере, до первого, для улучшения точности прогнозирования с использованием стандартных данных метеостанций и вычисления по ним коэффициентов преломления тропосферы. В настоящей работе рассмотрена возможность прогнозирования коэффициента преломления с использования метеоданных измеренных в трех опорных точках пространства.

Метод прогнозирования

Пусть в некоторых точках пространства $i \in (1, N)$ существует возможность измерения метеорологических параметров: температуры t , давления P , влажности e с достаточно высокой точностью. В настоящее время существующая сеть метеорологических станций позволяет измерять температуру с ошибкой $\pm 0,1^0$, давление - $\pm 0,1$ мм/рт. ст., относительную влажность $\pm 1\%$. Эти данные позволяют вычислить значение коэффициента преломления [5]. Для прогнозирования коэффициента преломления N в точке пространства $\{x, y\}$ будем использовать данные по коэффициентам преломления $N_i, i \in (1...3)$ и их координатам в плоскости и по высоте $\{x_i, y_i, h_i\}$. Точки, выбранные в качестве опорных и та точка, в которой осуществляется прогноз коэффициента преломления, должны обладать морфологическим подобием. Это означает, что характер изменения коэффициентов преломления в этих точках должен быть сходным. При расчетах необходимо учитывать высоту расположения опорных и прогнозируемой точек. Это можно сделать в рамках экспоненциальной модели тропосферы. При этом все коэффициенты преломления необходимо пересчитать к высоте расположения прогнозируемой точки. Исходными для расчета являются плоскостные координаты измерительного пункта $\{x_i, y_i\}$, их высоты $\{h_i\}$ и коэффициенты преломления $\{N_i = (n_i - 1) * 10^{-6}\}$. Имея данные, минимум в трех точках пространства, можно провести через них плоскость и использовать ее уравнение для прогнозирования коэффициента преломления в интересующей точке пространства. Используя данные по температуре, давлению и влажности рассчитаны коэффициенты преломления для пунктов, которые планируется использовать в СКНО Украины, а также ежемесячно коэффициенты их парной взаимной корреляции, которые для января и июня представлены в табл. 1.

Таблица 1. Взаимная корреляция коэффициентов преломления и расстояния между городами

	Белгород	Евпатория	Киев	Курск	Николаев	Одесса	Полтава	Сумы	Харьков	Черкассы
январь 2009 г.										
Белгород	1	0,4	0,84	0,94	0,61	0,55	0,87	0,88	0,93	0,8
Евпатория	0,021	1	0,54	0,34	0,79	0,77	0,39	0,43	0,46	0,55
Киев	0,45	0,23	1	0,81	0,73	0,7	0,8	0,79	0,81	0,88
Курск	0,85	-0,02	0,60	1	0,58	0,48	0,82	0,86	0,87	0,74
Николаев	0,28	0,31	0,46	0,26	1	0,93	0,68	0,71	0,72	0,78
Одесса	0,01	0,56	0,43	0,11	0,51	1	0,62	0,63	0,67	0,73
Полтава	0,74	-0,10	0,37	0,67	0,35	-0,06	1	0,94	0,95	0,87
Сумы	0,82	-0,12	0,58	0,90	0,20	0,01	0,76	1	0,94	0,87
Харьков	0,89	-0,13	0,23	0,72	0,27	-0,16	0,78	0,65	1	0,86
Черкассы	0,39	0,19	0,88	0,55	0,50	0,36	0,39	0,53	0,19	1
июнь 2009 г.										

Такой выбор обусловлен тем, что экспериментально установлено, что наибольшая изменчивость коэффициентов преломления наблюдается в летние месяцы (июнь, июль), а наименьшая - зимой (декабрь, январь). Анализ представленных данных показывает, что существуют группы точек, изменения коэффициентов преломления атмосферы в которых сильно коррелированы. Так, можно выделить точки в сухопутной части: Курск, Белгород, Сумы, Харьков, в прибрежной части: Евпатория, Николаев, Одесса и по берегу Днепра: Киев, Черкассы которые имеют высокую корреляцию коэффициентов преломления, а значит, можно говорить об их морфологическом подобии.

Анализ зависимости коэффициентов корреляции от расстояния между городами показал, что для летнего периода пространственный радиус корреляции по уровню 0,5 составляет 250...275 км, а в зимние месяцы достигает 600...625 км.

Иллюстрирует предложенный метод прогнозирования рис. 1. В качестве опорных точек для прогноза коэффициента преломления в г. Белгороде (рис. 1 а) использовались данные в г.г. Харьков, Сумы, Курск. Поведение коэффициента преломления в выбранных городах морфологически подобно его поведению в г. Белгороде. Коэффициенты парной корреляции составляют от 0,82 до 0,89. Полученные по измерениям метеопараметров коэффициенты преломления пересчитаны с учетом экспоненциальной модели тропосферы на высоту прогнозируемого г. Белгорода и позволяют определить сначала коэффициенты в уравнении аппроксимирующей плоскости, а затем и значения прогнозируемого коэффициента преломления. Полученные в ходе прогнозирования и экспериментальные данные приведены на рис. 1 а. Коэффициент корреляции расчетных и экспериментальных данных составляет около 0,92. Аналогичным образом были прогнозированы данные по коэффициенту преломления в г. Черкассы – рис. 1 б. Опорными точками для прогноза были взяты г.г. Харьков, Киев, Николаев. Коэффициенты парной корреляции при этом были существенно ниже, чем в первом случае. Для г. Киева - 0,88, г. Николаева - 0,5 и г. Харькова – 0,19.

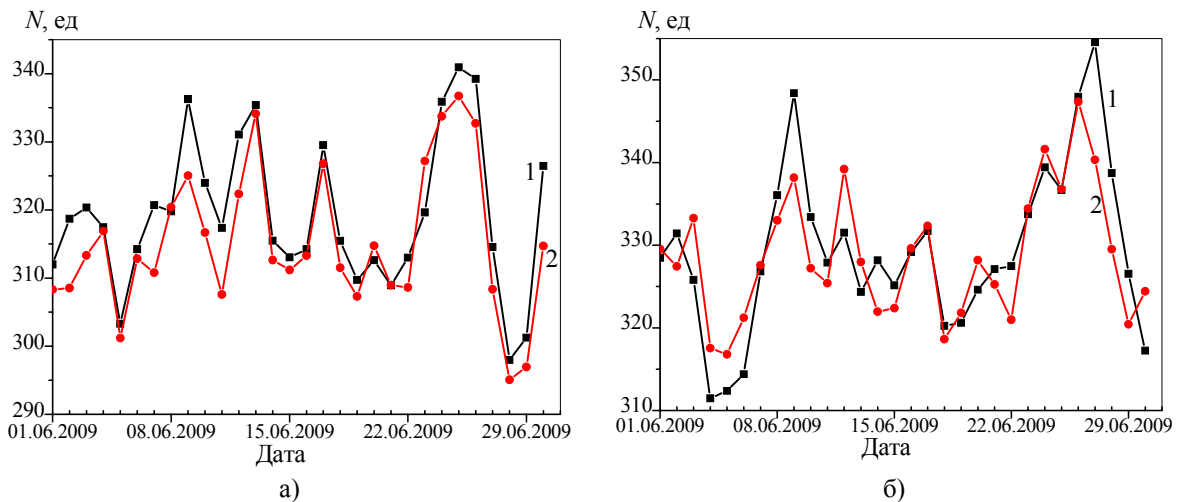


Рис. 1. Коэффициенты преломления: 1 – расчет, 2 - эксперимент, а) - г. Белгород (расстояние до опорных точек 75 км, 131 км, 122 км), б) - г. Черкассы (расстояние до опорных точек 308 км, 159 км, 273 км)

Поэтому ниже получилось и значение коэффициента корреляции расчетных (прогнозируемых) и экспериментальных данных – около 0,82. Из этого следует, насколько важен при прогнозе выбор морфологически подобных точек в качестве опорных. И выбор этот можно основывать на значениях парных коэффициентов корреляции.

Прогнозирование значений коэффициента преломления осуществлялось для периода конец мая - июнь, т.е. в весенне-летний период, когда обычно наблюдаются сильные суточные и сезонные его изменения. Несмотря на это предложенный подход дал неплохие результаты.

Использование метода в других регионах

Россия уделяет значительный интерес к разворачиванию навигационной спутниковой системы ГЛОНАС и разработка методов навигационно-космического обеспечения столь больших территорий является актуальной проблемой. Было выбрано 20 городов в разных

районах России. Для каждого города с использованием данных метеоцентров о температуре, давлении влажности были посчитаны коэффициенты преломления тропосферы для периода с июня 2009 г. по июнь 2010 г. Количество измерений составило около 35-40 тыс. за год. Проведен помесячно, а затем и за год парный корреляционный анализ коэффициентов преломления, результаты которого использованы для составления карт морфологически подобных точек - рис. 2. Линиями связаны точки, модуль коэффициента корреляции коэффициентов преломления в которых превышает 0,5: красной - в летний месяц - июль, зеленой - в зимний - январь. Эти данные наложены на карту годовой испаряемости.

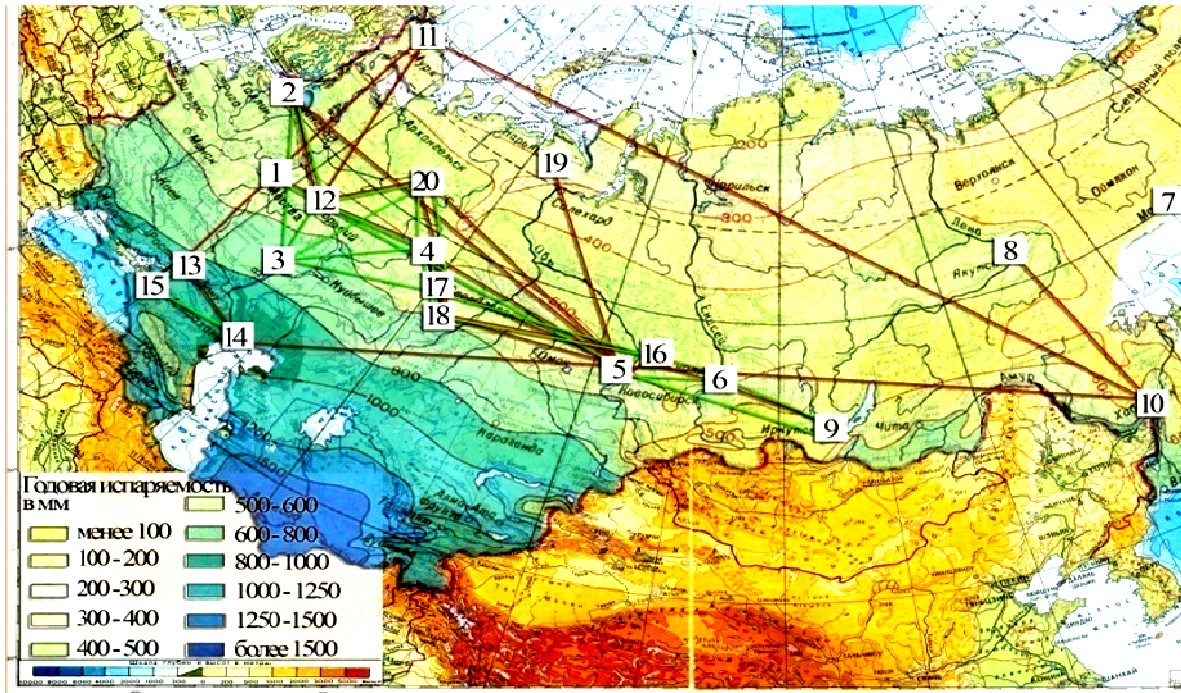


Рис. 2. Карта морфологически подобных точек России:

1. Москва ; 2. С-Петербург ; 3. Саратов ; 4. Пермь ; 5. Новосибирск ; 6. Красноярск ; 7. Магадан ;
 8. Якуск ; 9. Иркутск ; 10. Хабаровск; 11. Мурманск; 12. Н-Новгород; 13. Ростов на Дону; 14.
 Астрахань; 15. Краснодар; 16. Томск; 17. Екатеринбург; 18. Челябинск; 19. Воркута; 20. Сыктывкар; □
 корреляция данных по июлю месяцу более 0,5; □ корреляция данных по январю месяцу более 0,5

Следует отметить, что информация об испаряемости отдельных регионов, может быть полезна при выборе исходного массива точек, который будет проверяться на морфологическое подобие поведения коэффициентов преломления. Аналогичным образом может использоваться и карта выпадения осадков. Кроме осадков и испаряемости существенную роль играет рельеф. Так особое поведение коэффициента преломления наблюдается и в г. Магадан (№7, Россия). Как в летний период, так и в зимний отсутствует какая либо значительная корреляционная связь с другими городами России. Коэффициенты корреляции для июля месяца 2009 г. порядка $-0,001...0,38$, для января 2010 г. порядка $0,06...0,4$. Для г. Якутска подобие наблюдается с г. Хабаровском и то только в летний период. В зимний период для этого региона характерно особое поведение коэффициента преломления, о чем указывалось ранее в работе [7]. Необходимо отметить, что выбор опорных точек по результатам среднегодовой корреляции является достаточно грубым. Его уточнение возможно при использовании ежемесячных данных по корреляции коэффициентов преломления в отдельных пунктах.

Выводы

Предложен метод оценки коэффициента преломления использующий данные метеоцентров в трех морфологически подобных точках пространства. Показано, что расстояние между выбираемыми опорными пунктами сетки при покрытии региона не должно превышать 250 км для летних месяцев и 600 км - для зимних. Предложено для подбора опорных точек использовать подобие поведения коэффициента преломления, оцениваемое по коэффициенту

парной корреляции. Для предварительного отбора точек для анализа можно использовать годовые карты выпадения осадков и испаряемости, а также физические карты региона. При этом выбираются группы точек соответствующие примерно одинаковым условиям по осадкам и испаряемости, высотам, а также региональным особенностям (наличие морей, крупных рек).

ЛИТЕРАТУРА

1. Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty, Understanding GPS: Principles and Applications.- Boston, London: Artech House, 1996. - 692 p.
2. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. - 3-е изд., перераб. - М.: Радиотехника, 2005.- 688 с.
3. European Space Agency (ESA), Galileo navigation [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>.
4. Лукьянов А.М. Коррекция тропосферных задержек сигналов спутниковых радионавигационных систем в СКНОУ // Международный радиофорум МРФ 2005 «Международная конференция по системам локации и навигации (МКСЛН-2005)» «Дистанционное зондирование атмосферы и поверхности Земли», Харьков, 19-23 сентября 2005г.-Т2.- С.536-539.
5. Бин Б.Р., Даттон Е.Дж. Радиометеорология; Пер. с англ. Т.И. Арсеньян; Под ред. А.А. Семенова.- Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1971.- 362 с.
6. Гомбоев Н.Ц., Цыдыпов Ч.Ц. Рефракционные свойства атмосферы континентальных районов.- Новосибирск: Наука, 1985. – 126 с.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ ФЛУКТУАЦИЙ ОГИБАЮЩЕЙ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ, ПРОШЕДШИХ НАЗЕМНУЮ ТРАССУ РРВ

К.Е. МУХОМОР

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
НИИ Радиотехнических систем,
г. Томск, пр. Ленина, 40, E-mail: rwplab@ms.tusur.ru*

Рассчитаны функции временной и пространственной корреляции внутриимпульсных флуктуаций огибающей радиолокационного сигнала на наземных трассах различного характера. Проведено сравнение результатов, полученных в различные сезонные периоды. Исследована зависимость коэффициентов корреляции от выбора временного сечения внутри импульса.

CORRELATION FUNCTIONS OF ENVELOPE PULSE SIGNALS PASSED GROUND PROPAGATION PATH OF RADIO WAVES

K.E. MUKHOMOR

Factors of time and spatial correlation of intra-pulse fluctuations of radar signal are calculated, on the ground tracks of various kinds. Researches were spent for traces of various kinds. Comparison of results received in the various seasonal periods is spent. Dependence of factors of correlation on a choice of time section in an impulse is investigated.

Цель работы

На основе экспериментальных данных рассчитать функции пространственной и временной корреляции внутриимпульсных флуктуаций огибающей простого импульсного сигнала после прохождения трассы РРВ, исследовать зависимость полученных коэффициентов от выбора временного сечения внутри импульса и оценить их сезонную зависимость.

Описание экспериментальной аппаратуры и методики оценки исследуемых параметров

Для исследования использовались результаты экспериментальных измерений, полученные в ходе экспедиций НИИ РТС в 2007 и 2010 годах. В 2007 году измерения проводились в зимнее время, а в 2010 году – в конце лета.

Для исследования были выбраны две различные по дальности и характеру трассы. Первая трасса – открытая, протяженностью 16,5 км и вторая трасса – закрытая, протяженностью 28 км [1].

В качестве источника излучения использовалась импульсная радиолокационная станция трехсантиметрового диапазона, со следующими техническими характеристиками:

- мощность излучения в импульсе – не менее 100 кВт;
- длительность излученного импульса – 300 нс;
- поляризация излучения – линейная;
- ширина диаграммы направленности антенны РЛС по половинной мощности – 2 градуса.

Приемная антенная система состояла из четырех рупорных антенн, согласованных для приема сигнала вертикальной поляризации. Схема расположения антенн и номера приемных каналов представлены на рис.1. Подробное описание экспериментальной аппаратуры представлено в [2].

Измерения проводились при взаимном наведении антенн источника и приемника, длительность записи составляла 10 секунд, количество зарегистрированных за это время импульсов составляло 1000.

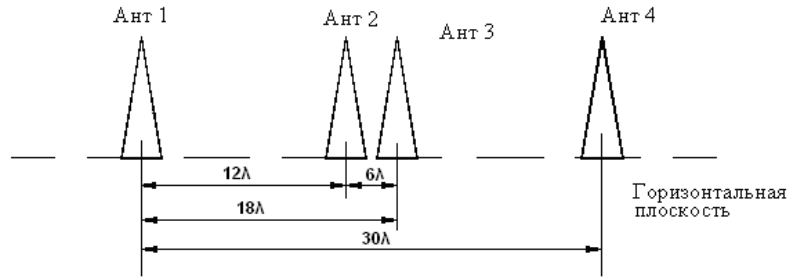


Рис. 1. Расположение антенн и нумерация каналов

Для оценки коэффициента пространственной корреляции были выбраны следующие пары каналов: **2 – 3** пространственное разнесение составляет 0,18 м или 6λ , **1 – 2** пространственное разнесение составляет 0,36 м или 12λ , **1 – 3** пространственное разнесение составляет 0,54 м или 18λ , **1 – 4** пространственное разнесение составляет 0,90 м или 30λ ;

Расчет коэффициентов корреляции для различных пар каналов проводился по формуле:

$$R_{xy} = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \cdot \frac{1}{N} \sum_i^N (x_i - \bar{x}_i) \cdot (y_i - \bar{y}_i), \quad (1)$$

где R_{xy} – значение коэффициента корреляции;

x_i – значение амплитуды сигнала в канале X во временном i-ом сечении;

y_i – значение амплитуды сигнала в канале Y во временном i-ом сечении;

\bar{x}_i – среднее значение амплитуды в канале X в i-ом временном сечении по всем зарегистрированным импульсам;

\bar{y}_i – среднее значение амплитуды в канале Y в i-ом временном сечении по всем зарегистрированным импульсам;

N – количество реализаций (1000 импульсов);

σ_x, σ_y – дисперсия значений амплитуды в каналах X и Y, соответственно.

На основании полученных коэффициентов корреляции проводилась оценка интервала пространственной корреляции путем аппроксимации полученной зависимости следующей функцией:

$$R = e^{-\left| \frac{\ell}{\ell_0} \right|}$$

где ℓ – разнесение антенн (0; 0,18; 0,36; 0,54; 0,9 м);

ℓ_0 – интервал пространственной корреляции.

Для расчета временной корреляционной функции внутриимпульсных флуктуаций огибающей, иными словами автокорреляционной функции, была использована следующая формула:

$$R_{xy} = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \sum_{t, \tau}^N [x(t + \tau) - \bar{x}] \cdot [y(t) - \bar{y}], \quad (2)$$

где R_{xy} – коэффициент взаимной корреляции;

σ_x, σ_y – дисперсия по X и Y соответственно;

t – время отсчета относительно “момента прихода” импульса;

τ – временной сдвиг;

N – количество реализаций.

Интервал временной корреляции определялся по уровню 0,37.

Вид формул (1), (2) отражает, что внутриимпульсные флуктуации в общем случае – нестационарный случайный процесс, характеристики которого зависят от времени t относительно “момента прихода” сигнала.

Результаты исследования и их интерпретация

На рис. 2 представлены примеры реализации амплитуды сигналов в различных каналах и коэффициенты корреляции, рассчитанные между отсчетами в этих каналах.

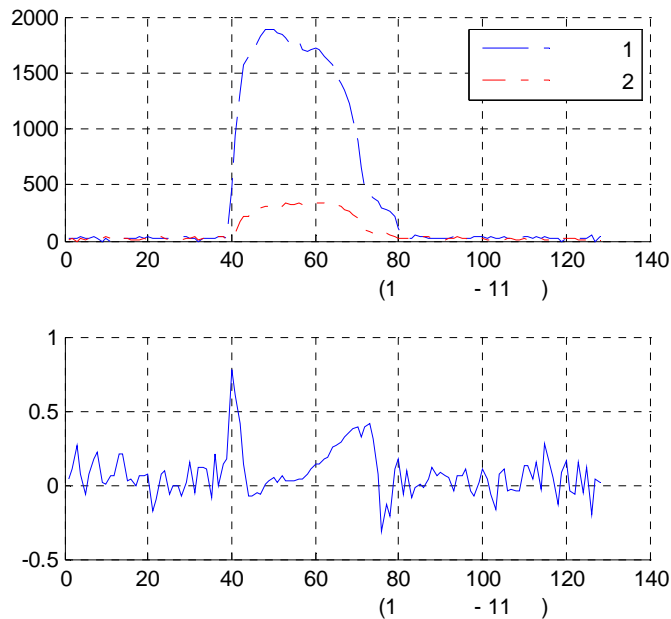


Рис. 2. Амплитуда и коэффициент корреляции флуктуаций огибающей в 1 и 2 каналах, разнесение 0,36 м

Результаты расчета интервала пространственной корреляции внутриимпульсных флуктуаций для двух трасс при различных временных сечения сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Интервалы пространственной корреляции огибающей сигнала

Временное сечение относительно начала импульса, нс	Интервал пространственной корреляции, параметр ℓ_0 , м (λ)			
	Открытая трасса; 16,5 км		Закрытая трасса; 28 км	
	Измерения 2007 года	Измерения 2010 года	Измерения 2007 года	Измерения 2010 года
33	0,95 (31 λ)	0,25 (8 λ)	0,23 (8 λ)	0,23 (7 λ)
154	0,12 (4 λ)	0,23 (7 λ)	0,25 (8 λ)	0,16 (5 λ)
264	0,13 (4 λ)	0,21 (7 λ)	0,55 (18 λ)	0,22 (7 λ)
396	0,11 (4 λ)	0,28 (9 λ)	0,25 (8 λ)	0,23 (7 λ)

На рис. 3 представлены зависимость интервала пространственной корреляции от момента отсчета относительно начала импульса для двух сезонов.

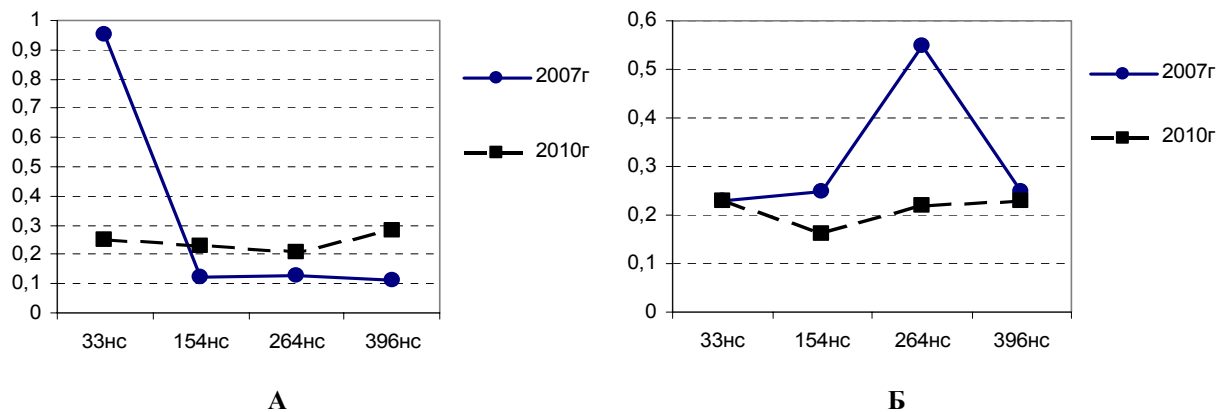


Рис. 3. Зависимость интервала пространственной корреляции от задержки относительно начала импульса:
 А - Представлены результаты, полученные на открытой трассе в 2007 и 2010 годах;
 Б - Представлены результаты, полученные на закрытой трассе в 2007 и 2010 годах

По вертикальной шкале отложена величина интервала пространственной корреляции, по горизонтальной отложены временные сечения относительно начала импульса в нс.

В таблице 2 представлены результаты оценки интервала временной корреляции полученные на разных трассах в различные сезоны.

Таблица 2. Интервал временной корреляции внутриимпульсных флуктуаций огибающей

Трасса	Интервал временной корреляции, нс	
	Результаты 2007 г (зима)	Результаты 2010 г (лето)
Открытая; 16,5 км	32,5	32,1
Закрытая; 28 км	22	32,6

На рис. 4 представлена рассчитанная по данным 2010 года временная корреляционная функция для разных приемных каналов. Вертикальная шкала – значение коэффициента корреляции, горизонтальная шкала – временной интервал в нс.

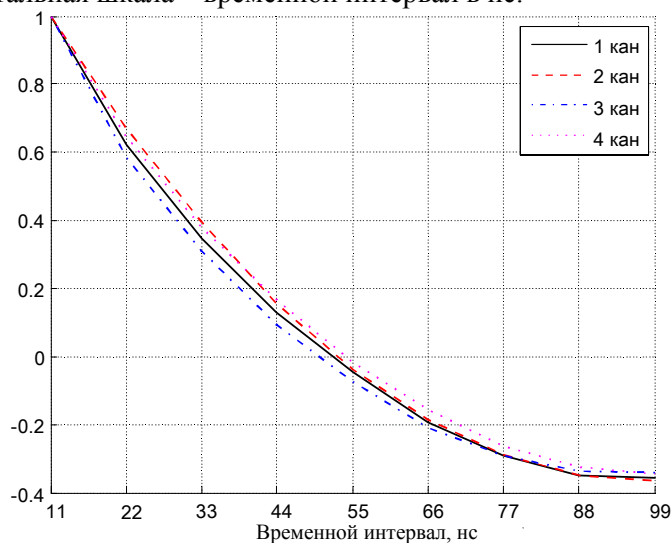


Рис. 4. Пример рассчитанных временных корреляционных функции

Выводы

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что четко прослеживаемой зависимости пространственной корреляции, от выбора момента отсчета, нет. На обеих трассах для различных моментов отсчета получены схожие по значению результаты, для открытой трассы величина интервала пространственной корреляции составила примерно 4-5 длин волн, для закрытой трассы 8 длин волн.

Сезонная зависимость интервала пространственной корреляции проявилась только на открытой трассе, величина интервала пространственной корреляции по данным зимних измерений в среднем в 1,5-2 раза меньше результатов полученных летом.

На открытой трассе не было выявлено какой-либо зависимости интервала временной корреляции от времени года, во время летних и зимних измерений он составил 32 нс. В то время как на закрытой трассе по результатам зимних измерений интервал временной корреляции внутриимпульсных флуктуаций в 1,5 раза меньше, чем в летних измерениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов В.П., Крутиков М.В., Колядин Н.А.. Экспериментальное исследование двухбазового фазового пеленгатора на наземной трассе. - труды XXII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» РРВ-22. г. Ростов-на-дону – п. Лоо. 2008 г. – Том 2. – С. 125-128.
2. Ровкин М.Е, Крутиков М.В, Мещеряков А.А, Осипов М.В, Зайцев В.А, Бутырин Е.Ю. Измерительный комплекс для исследования пространственно-временного искажения радиосигналов трехсантиметрового диапазона на наземных трассах. – Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. – 2006. – №6. – С. 7-11.

АТМОСФЕРНАЯ РЕФРАКЦИЯ НА РАДИОЗАТМЕННЫХ ТРАССАХ СПУТНИК – СПУТНИК

А.А. ПАВЕЛЬЕВ, С.С. МАТЮГОВ, О.И. ЯКОВЛЕВ, А.Г. ПАВЕЛЬЕВ

*ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
141190, Московская область, Фрязино, пл. Введенского, 1,
E-mail: pvlv@ms.ire.rssi.ru*

Дан анализ атмосферной рефракции на затменных трассах навигационные спутники GPS – низкоорбитальные спутники FORMOSAT-3. Приведены зависимости угла рефракции от минимальной высоты лучевой линии над европейской частью России. Дана аналитическая аппроксимация среднего высотного профиля угла рефракции за период 2006-2010 годов и приведены данные о медленных сезонных и суточных вариациях и быстрых флуктуациях угла рефракции в тропосфере. Отмечается, что высотная зависимость угла рефракции является чувствительной характеристикой, отражающей кратковременные погодные и долговременные климатические изменения состояния атмосферы.

REFRACTION IN THE ATMOSPHERE IN THE RADIO OCCULTATION LINK SATELLITE-TO-SATELLITE

A. A. PAVELYEV, S.S. MATYUGOV, O.I. YAKOVLEV, A.G. PAVELYEV

An analysis of the atmospheric refraction effect in the radio occultation link a navigational satellite GPS - low orbital satellite FORMOSAT-3 is presented corresponding to the European part of Russia. The dependences of the bending angle on the altitude of the radio ray perigee are given and an analytical formula for the average vertical profile of the refractive angle relevant to the period 2006-2010 is derived. The data describing small-scale, long-scale, diurnal, and seasonal variations of the refractive angle in the troposphere are provided. It is shown that the altitude dependence of the refractive angle is very sensitive characteristic of the small-scale weather and long-scale climate variations in the atmosphere.

Развитие космической техники привело к появлению нового направления экспериментальной и теоретической радиометеорологии, в котором используются данные радиозатменного зондирования, осуществляемого с помощью двух спутников, один из которых излучает, а другой принимает радиоволны, прошедшие через атмосферу. При этом определяются минимальная высота лучевой линии (перигей) и угол рефракции. На затменных трассах спутник-спутник используются высокоточные измерения доплеровского смещения частоты радиосигналов, обусловленного влиянием атмосферы [1-4].

Высотные зависимости угла рефракции на трассах спутник-спутник в разных регионах представляют самостоятельный интерес из-за их чувствительности к погодным и климатическим факторам и в этом смысле угол рефракции можно рассматривать как метеорологическую характеристику. В радиодиапазоне угол рефракции не зависит от орбит спутников или характеристик приемно-передающих устройств, его значение определяется прецизионно, что обусловлено высокой точностью измерений доплеровского смещения частоты сигнала. Привязка значений угла рефракции к высоте зондируемого слоя атмосферы обеспечивается высокой точностью измерений координат и скоростей спутников.

Цель работы состоит в анализе результатов измерений над европейской частью России зависимости угла атмосферной рефракции от минимальной высоты лучевой линии. Для этого определяются средний высотный профиль угла рефракции и обсуждаются его медленные суточные вариации и быстрые флуктуации.

Для определения радиозатменным методом угла рефракции использовались радиоволны с частотами $f_1 = 1575,42$ МГц и $f_2 = 1227,6$ МГц, излучаемые навигационными спутниками GPS и принимаемые после прохождения их через атмосферу низкоорбитальными спутниками FORMOSAT-3. Созвездие из ~ 30 спутников GPS с орбитами высотой ~ 20000 км

и 6 низкоорбитальных спутников, имеющих орбиты с высотой 800 км, обеспечивало за сутки около 2500 зондирований атмосферы в разных районах Земли. Измерения атмосферной составляющей приращения фазового пути и, соответственно, доплеровского сдвига частоты сигналов, обусловленных рефракцией в атмосфере, осуществлялось с частотой выборок 50 Гц. Скорость изменения высоты перигея уменьшается по мере погружения лучевой линии и при используемой частоте отсчетов шаг измерений по высоте составлял ~ 50 м при зондировании стратосферы и около 5 м в нижней тропосфере.

При анализе пространственно-временных вариаций угла рефракции мы использовали результаты зондирования атмосферы в области, охватывающей европейскую часть России с координатами $(50-60)^{\circ}$ с.ш. и $(30-40)^{\circ}$ в.д. Протяженность зондируемой области вдоль меридиана составляет ~ 1100 км, а вдоль широтного круга – около 600 км. Каждые сутки в этой области проводилось от 3 до 7 сеансов измерений, так что за период с мая 2004 г. до августа 2010 г. в этой области было осуществлено ~8000 радиозатменных зондирований атмосферы.

Ошибка однократного отсчета значения ξ в используемых данных не превосходит 0,01 мрад. Более сложным является ответ на вопрос о точности определения высоты, к которой относится значение угла ξ . Это обусловлено тем, что по измерениям непосредственно находится зависимость угла рефракции от прицельного параметра, который определяется как произведение коэффициента преломления атмосферы и радиуса кривизны лучевой линии в перигее. Атмосфера не обладает сферической симметрией и, следовательно, центр кривизны не совпадает с центром Земли. Для получения высотной привязки при обработке данных определяются координаты центра кривизны лучевой линии, его расстояние от центра Земли и затем высота зондируемого атмосферного слоя над уровнем моря, т.е. над поверхностью геоида, описываемого референц – эллипсоидом WGS84 (World Geodetic System 1984). Мы оцениваем погрешность высотной привязки величиной ± 100 м.

Климатические и погодные факторы изменяют условия рефракции в разных регионах. Для прогноза условий распространения радиоволн и возможного использования угла рефракции как метеорологической характеристики необходимо изучить изменчивость его высотных зависимостей за разные периоды времени.

Угол рефракции быстро уменьшается при увеличении высоты перигея лучевой линии H : от ~ 24 мрад при $H=0,2$ км до 0,3 мрад при $H=30$ км и для анализа его малых возмущений, обусловленных влиянием разных факторов, надо исключить регулярную составляющую, связанную с быстрым уменьшением плотности атмосферы при увеличении высоты. Для этого по большому массиву экспериментальных данных нами была определена средняя аналитическая высотная зависимость угла рефракции $\xi_m(H)$ и относительно неё рассматривались его пространственно-временные изменения. Высотная зависимость $\xi_m(H)$ была определена путем усреднения результатов 8711 сеансов измерений, осуществленных за четырехлетний период в двух регионах. Дополнительно к данным, полученным в районе с координатами $(50-60)^{\circ}$ с.ш., $(30-40)^{\circ}$ в.д., были использованы результаты зондирования атмосферы в том же широтном поясе $(50-60)^{\circ}$ с.ш., но с восточной долготой от 160° до 170° . Второй район охватывает восточное побережье Камчатки и прилегающую территорию Берингова моря и характеризуется морским климатом. Использование данных измерений в двух областях позволило определить аналитическую зависимость $\xi_m(H)$, пригодную для анализа пространственно-временных вариаций угла рефракции в регионах с разными климатическими условиями.

Проведенный анализ показал, что средняя высотная зависимость угла рефракции на высотах от уровня моря и до 40 км хорошо описывается функцией вида

$$\xi_a(H) = \exp\left[-\left(a + bH + cH^2 + dH^3\right)\right] \quad (1)$$

Если угол рефракции выражен в миллирадианах, а высота в километрах, то коэффициенты в показателе экспоненциальной функции (1) имеют следующие значения: $a = -3,226$, $b = 0,1544 \text{ км}^{-1}$, $c = -3,765 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-2}$, $d = 1,487 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-3}$ для $H \leq 12,4$ км (2)

$a = -3,611$, $b = 0,166 \text{ км}^{-1}$, $c = -4,128 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-2}$, $d = 6,374 \cdot 10^{-6} \text{ км}^{-3}$ для $H > 12,4$ км (3)

Функция (1) с коэффициентами (2) и (3) не описывает особенностей в высотной зависимости угла рефракции, связанных, например, с изменениями высоты тропопаузы в зондируемых районах, но ее применение облегчает обнаружение возмущений угла рефракции в индивидуальных сеансах измерений и объяснение их причин.

Сравнение измеренных и рассчитанных по модели (1) углов рефракции приведено в таблице. В первой колонке таблицы указана высота зондируемой области H ; во второй – средний по данным 8711 сеансов измерений, осуществленных за четырехлетний период в двух регионах, угол рефракции ξ_m ; в третьей – среднеквадратичное значение вариаций угла рефракции за тот же период σ_m , в четвертой колонке – угол рефракции ξ_a , рассчитанный по модели (1), и в пятой – разность измеренных и модельных значений угла рефракции $\Delta\xi_m = \xi_m - \xi_a$.

Таблица. Рефракционные параметры, определенные в экспериментах 2006-2010 гг.

H , км	ξ_m , мрад	σ_m , мрад	ξ_a , мрад	$\Delta\xi_m$, мрад	H , км	ξ_m , мрад	σ_m , мрад	ξ_a , мрад	$\Delta\xi_m$, мрад
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0,2	23,96	2,19	24,41	-0,45	8	8,82	0,35	8,63	0,18
0,4	23,57	2,25	23,68	-0,11	9	7,99	0,32	7,64	0,35
0,6	23,03	2,23	22,98	0,06	10	7,17	0,34	6,75	0,41
0,8	22,50	2,19	22,30	0,20	12	5,36	0,42	5,25	0,11
1	21,95	2,15	21,65	0,29	14	3,83	0,21	3,87	-0,04
2	19,94	1,91	18,75	0,19	16	2,81	0,15	2,82	-0,01
3	16,16	1,43	16,32	-0,16	18	2,07	0,11	2,06	0,01
4	13,99	0,98	14,28	-0,29	20	1,51	0,08	1,50	0,01
5	12,26	0,64	12,55	-0,29	25	0,69	0,04	0,68	0,002
6	10,88	0,45	11,06	-0,18	30	0,31	0,02	0,31	-0,003
7	9,76	0,38	9,76	-0,01	35	0,14	0,01		

В таблице видно, что наиболее значительные изменения угла рефракции наблюдаются в тропосфере на высотах до 6 км. Эти изменения обусловлены различием погодных в зондируемых районах. Отклонение $\Delta\xi_m(H)$ модельной зависимости от среднего измеренного угла рефракции на этих высотах в несколько раз меньше его среднеквадратичных вариаций σ_m . Заметные отклонение $\Delta\xi_m(H)$, связанные с изменением высоты тропопаузы, присутствуют на высотах от 9 до 12 км. В стратосфере - выше 14 км - относительные вариации угла рефракции σ_m/ξ_m примерно в два раза меньше, чем в тропосфере, а отклонение модельных значений ξ_a от средних измеренных ξ_m не превышает 1%. Аппроксимация высотной зависимости угла рефракции хорошо соответствует экспериментальным данным до высоты $H=50$ км.

Измерения угла ξ при высоте лучевой линии, равной 0,2 км, представляют интерес для радиосвязи и радиолокации, так как позволяют определить значение ξ при наблюдении с поверхности в направлении горизонта объекта, находящегося выше стратосферы. Угол рефракции в этом случае в два раза меньше измеренного на трассе спутник-спутник и в среднем равен $12,0 \pm 1,5$ мрад.

Наиболее значительные возмущения угла рефракции, обусловленные погодными и климатическими факторами, наблюдаются в тропосфере и нижней стратосфере. По этой причине при анализе возмущений угла рефракции ограничим высотный интервал от поверхности до 14 км и сравним результаты наблюдений в зимнее и летнее время.

Для иллюстрации медленных возмущений высотного профиля угла рефракции рассмотрены высотные зависимости отклонения наблюдаемых углов рефракции от модельных значений в конкретных сеансах измерений $\Delta\xi(H) = \xi(H) - \xi_a(H)$, которые позволяют выявить влияние на рефракцию регулярных слоистых структур различной природы.

Для зимней ночи характерно стационарное состояние тропосферы со слоистыми структурами с явно выраженными максимумами значений $\Delta\xi$ на высотах 1,5...2,7 км

и 3,5...4 км, соответствующими наибольшим вертикальным градиентам коэффициента преломления. Максимальные значения $\Delta\xi$ достигают 4 мрад, а толщина слоев составляет от 0,7 до 1,5 км. Более существенны возмущения рефракции в летний период. Отклонения угла рефракции от средних значений летом в дневное время составляют от 4 до 10 мрад на высотах от 0,7 до 5 км. Причиной этого являются более высокое содержание и значительные вариации высотного распределения водяного пара в летней атмосфере по сравнению с зимой.

В интервале высот 9...14 км в зависимости от сезона и времени суток регулярно регистрируются плавные отклонения $\Delta\xi$ угла рефракции от средних значений, обусловленные температурной инверсией в тропопаузе. В отличие от возмущений угла рефракции в нижней тропосфере, связанных с вариациями влажности, температурная инверсия в тропопаузе приводит к незначительному увеличению угла ξ в диапазоне 0,6...1,3 мрад. Высота расположения локального максимума $\Delta\xi$ соответствует высоте с минимальной температурой в тропопаузе, определяемой по метеорологическим наблюдениям.

Кроме медленных – сезонных и суточных – вариаций угла рефракции на высотах ниже 9 км наблюдаются значительные быстрые флуктуации, обусловленные неоднородностями атмосферы. Мы проанализировали флуктуации угла ξ в зимнее и летнее время без разделения по времени суток по результатам 100 сеансов измерений, осуществленных в каждом сезоне.

Летом интенсивность флуктуации угла ξ в 1,5...2 раза выше, чем зимой, что свидетельствует о более устойчивой вертикальной стратификации зимней атмосферы. Повышенная интенсивность флуктуаций угла рефракции летом 2010 года, очевидно, обусловлена аномально жаркой погодой в европейской части России в это время. Интенсивность флуктуаций закономерно уменьшается при увеличении высоты, причем быстрее, чем уменьшение угла ξ . Если угол ξ в интервале высот от 1 до 8 км уменьшается примерно в 2,5 раза, то флуктуации уменьшаются в 6...7 раз, как в зимний, так и в летний период наблюдений. Следовательно, величина σ_ξ является косвенной экспериментальной оценкой интенсивности мелкомасштабных неоднородностей атмосферы, обусловленных разными причинами.

Метод затненного радиопросвечивания атмосферы на трассах спутник-спутник позволяет получать высокоточные зависимости угла рефракции от минимальной высоты лучевой линии в разных районах Земли. Высотные профили угла рефракции являются чувствительной характеристикой атмосферы, так как они отражают кратковременные изменения погоды, а также могут служить маркером для обнаружения и отслеживания долговременных изменений состояния атмосферы. Экспериментальные высотные зависимости угла рефракции находятся без использования каких-либо предположений и - в этом смысле - они являются более достоверным индикатором состояния атмосферы. В докладе мы ограничились радиофизическим аспектом задачи и поэтому привели только ограниченные сведения о средних значениях и о диапазоне многолетних медленных изменений, о сезонных и суточных вариациях, о быстрых флуктуациях угла рефракции для обширного района европейской части России. Сезонные и погодные изменения рефракции требуют детального сопоставления с такими метеорологическими факторами как облачность, инверсии температуры, волновые и турбулентные явления, определенными в зондируемом районе почти одновременно другими методами. Такой анализ, а также возможности определения высотной зависимости содержания в атмосфере водяного пара и интегрального содержания воды над зондируемым районом по данным о вариациях угла рефракции будут рассмотрены в другой работе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 10-02-01015-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бин.Б.Р., Даттон Е.Д. Радиометеорология. Л.: Гидрометеорология. 1971. - 362 С.
2. Колосов М.А., Шабельников А.В. Рефракция электромагнитных волн. М.: Советское радио. 1976. - 253 С.
3. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли. Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: URSS. 2010. - 208 С.

4. Liou Y.A., Pavelyev A.G., Matyugov S.S., Yakovlev O.I., Wickert J. Radio Occultation Method for Remote Sensing of the Atmosphere and Ionosphere. Ed.Y.A. Liou. INTECH. Published by In-Teh Olajnica 19/2, 32000 Vukovar, Croatia, 2010. 170 P. ISBN 978-953-7619-60-2.

ПОГЛОЩЕНИЕ В 2-Х ММ «ОКНЕ ПРОЗРАЧНОСТИ» АТМОСФЕРЫ

В.В. ПАРШИН, М.А. КОШЕЛЕВ, Л.М. КУКИН, Е.А. СЕРОВ,
М.Ю. ТРЕТЬЯКОВ, В.Н. ШАНИН, А.Ф. АНДРИЯНОВ

*Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Н-Новгород, ул. Ульянова 46,
E-mail: parsh@appl.sci-nnov.ru*

Представлены результаты исследования температурной зависимости параметров континуального поглощения в смеси водяного пара с азотом в диапазоне частот 107-143 ГГц. Измерения проведены в широком диапазоне температур от -12 до +55°C. Проанализировано отличие полученных результатов от результатов предыдущих работ. Показана обоснованность использования метода вариации дальности для устранения систематической ошибки определения параметров континуума.

THE ABSORPTION IN 2-MM ATMOSPHERE «TRANSPARENCY WINDOW»

At the frequencies 107-143 GHz the results of temperature dependencies investigations of continuum absorption in the Nitrogen and water vapor mixtures are presented. The measurements were made in the wide temperature range from -12C up to +55C. The discrepancy of our results from the previous investigations has been analyzed. The validity of the distance variation method used for excluding the systematic error of the continuum parameters determination has been demonstrated.

Введение

Прогнозирование распространения излучения в земной атмосфере опирается на информацию о спектре коэффициента поглощения при различных метеоусловиях (температура, давление, влажность). Точность информации, извлекаемой в результате зондирования, непосредственно зависит от адекватности модели распространения и от точности спектральных параметров, заложенных в модель. В настоящее время наиболее точные измерения спектральных параметров атмосферных газов осуществляются в лабораторных условиях. Отдельно исследуются вклады различных механизмов поглощения: резонансное поглощение в линиях кислорода и водяного пара и нерезонансное (континуальное) поглощение в окнах относительной прозрачности атмосферы, в которое наибольший вклад вносят водяной пар и азот. Результаты лабораторных экспериментов непосредственно используются в моделях атмосферного поглощения.

Исследования континуального поглощения имеют достаточно долгую историю [1-3] и важны для решения ряда фундаментальных и прикладных проблем. Одна из них – это собственно определение механизма этого поглощения. До настоящего времени этот вопрос является предметом для дискуссий. Высказываются предположения о возможном совместном действии нескольких механизмов, таких как поглощение стабильными или метастабильными молекулярными комплексами (в том числе димерами воды) и поглощение, индуцированное столкновениями. Из прикладных задач, для которых необходимо прецизионное исследование континуального поглощения, следует отметить построение моделей поглощения, используемых для дистанционного зондирования, для расчета радиационного баланса Земли, а также для радиосвязи и, особенно, радиолокации в окнах относительной прозрачности атмосферы [4].

Несмотря на длительную историю исследований, результаты лабораторных и полевых измерений континуального поглощения зачастую не согласуются друг с другом с требуемой для практических приложений точностью [5]. Во многом это объясняется сложностью исследований ввиду малости величины континуального поглощения по сравнению с резонансным, а также наличием разного рода систематических ошибок во «влажных» экспериментах.

Целью настоящей работы являлось проведение исследования температурной зависимости параметров континуального поглощения в смеси водяного пара с азотом в диапазоне частот

107-143 ГГц и, что особенно важно, в широком диапазоне температур реальной атмосферы и впервые при отрицательных температурах от - 12 до +55°C.

Проанализировано отличие полученных результатов от результатов предыдущих работ. Показана обоснованность использования метода вариации дальности для устранения систематической ошибки определения параметров континуума.

Резонаторный метод исследований.

Для построения моделей распространения ММ и СубММ волн при различных метеоусловиях (давлениях, температурах, влажностях) необходима информация, как о параметрах линий поглощения, так и о «континууме».

Получить прецизионную информацию путём измерения поглощения на длинных открытых трассах невозможно ввиду неконтролируемости метеоусловий. Но только "длинная" трасса позволяет набрать сколь-нибудь заметное поглощение для исследования, например континуального поглощения в окнах прозрачности или в линиях с малым поглощением [2]. Поэтому для прецизионных исследований атмосферного поглощения используются высокодобротные открытые резонаторы типа Фабри-Перо с огромной эффективной длиной пути [3,6-10]. Резонатор размещается в климатической камере с контролируемой температурой и дозированной подачей азота, кислорода, сухого воздуха и паров воды. Однако исследование поглощения в водяном паре имеет свою специфическую особенность, связанную с добавочным неконтролируемым поглощением, вызванным осаждением воды на зеркалах и элементах связи резонатора. При исследовании малого поглощения эта ошибка становится определяющей. Поэтому в ИПФ РАН была разработана резонаторная методика исследования поглощения в водяном паре, позволяющая исключить неопределённость в расчётах поглощения, связанную с изменением добротности резонатора из-за неконтролируемой конденсации паров воды на его зеркалах [9,10].

Принципиальным новшеством является использование двух резонаторов, полусферического и симметричного, выполненных как единый блок (рис.1.). Все три сферических зеркала геометрически идентичны, а потери во всех 4-х зеркалах (измеренные отдельно) совпадают в пределах ошибки измерений. Таким образом, используются два резонатора с одинаковой структурой поля, но различающихся по длине ровно в два раза (резонаторный вариант метода вариации дальности). Такое решение позволяет исключить неконтролируемое изменение потерь в зеркалах за счёт абсорбции водяных паров, особенно при низких температурах и больших влажностях.

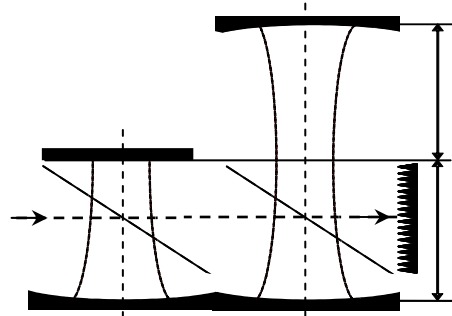


Рис. 1. Блок резонаторов

Суммарные потери в резонаторах на один проход (P_{Σ}) запишем в виде (нижний индекс (2) относится к "длинному" резонатору):

$$P_{\Sigma 2} = 2\pi q \Delta f_2 / f = P_{\text{Зеркала}2} + P_{\text{связи}2} + 2\gamma L$$

$$P_{\Sigma 1} = \pi q \Delta f_1 / f = P_{\text{Зеркала}1} + P_{\text{связи}1} + \gamma L$$

Из разности этих уравнений получаем: $\gamma = \pi q (2\Delta f_2 - \Delta f_1) / Lf$
 где: f – резонансная частота; Δf – соответствующая ширина резонансной кривой; q – количество полуволн в резонаторе (количество продольных мод). γ – коэффициент поглощения в газе.

Таким образом, если зеркала и плёнки связи в обоих резонаторах одинаковы и одинаково адсорбируют воду, тогда величины $P_{\text{Зеркала}}$ и $P_{\text{связи}}$ исключаются из расчётов.

Первые же результаты выявили, что даже при малых влажностях адсорбция воды вносит значительную погрешность в величину измеренного континуального поглощения.

На рис. 2. приведены зависимости континуального поглощения в водяном паре, измеренные отдельно с помощью короткого и длинного резонаторов и разностным методом, наглядно демонстрирующие влияние адсорбции воды на элементах резонаторов.

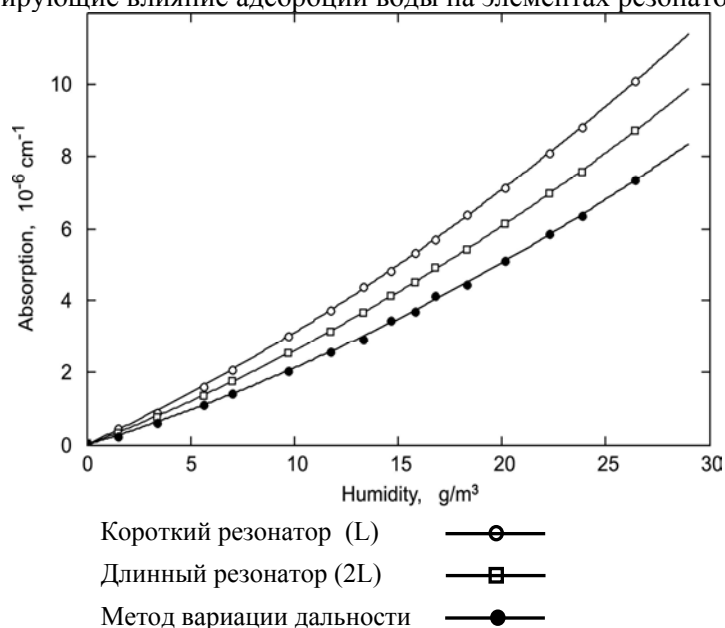


Рис. 2. Континуальное поглощение в смеси водяного пара с азотом, измеренные разными методами при атмосферном давлении при температуре $+40^\circ\text{C}$

Параметризация континуума водяного пара

Для описания континуального поглощения зачастую применяется следующее выражение:

$$a_{\text{cont}} = C_{\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2} \cdot P_{\text{N}_2} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}} + C_{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}} \cdot P^2_{\text{H}_2\text{O}}$$

где $P_{\text{N}_2, \text{H}_2\text{O}}$ – соответственно парциальные давления азота и водяного пара в смеси, $C_{\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2}$ и $C_{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}}$ – параметры континуума, отвечающие за взаимодействие молекул H_2O и N_2 и двух молекул H_2O соответственно.

В миллиметровом диапазоне:

$$\begin{aligned} C_{\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2}(v, T) &= C^0_{\text{N}_2} \cdot (300/T)^{(3+n_{\text{N}_2})} \cdot f; \\ C_{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}}(v, T) &= C^0_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (300/T)^{(3+n_{\text{H}_2\text{O}})} \cdot f^2 \end{aligned}$$

Извлекаемые параметры континуума: $C^0_{\text{N}_2}$, $C^0_{\text{H}_2\text{O}}$, n_{N_2} , $n_{\text{H}_2\text{O}}$.

Результаты исследований

Обобщённые результаты исследований континуума приведены в таблице в сравнении с результатами работ других авторов. Приведены линейные и квадратичные по влажности коэффициенты континуума и показатели степеней их температурных зависимостей.

Таблица. Параметры континуума

Параметры континуума	Настоящая работа	Bauer et all [7]	Liebe [6]	Ma & Tipping [11]
$\frac{\partial B / \text{км}}{\Gamma \zeta^2 \cdot \text{Па}^2}$				
$C_{\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2}$	$2.84(3) \cdot 10^{-9}$	$3.00(8) \cdot 10^{-9}$	$2.55 \cdot 10^{-9}$	$2.11 \cdot 10^{-9}$
$C_{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}}$	$0.80(1) \cdot 10^{-7}$	$0.911(16) \cdot 10^{-7}$	$0.984 \cdot 10^{-7}$	
$n_{\text{H}_2\text{O}}$	0.97(17)	1.34(28)	-0.5	1.982
n_{N_2}	6.05(45)	5.10(19)	0.5	

Заключение

Впервые получены параметры континуального поглощения в смеси водяного пара с азотом в диапазоне 107-143 ГГц в широком диапазоне температур (от -12 до +55°C). Показана обоснованность использования метода вариации дальности для устранения систематической ошибки определения параметров континуума.

Представленная работа поддержана частично грантами РФФИ 09-02-00053-а, 09-05-00586-а и грантом Президента РФ для молодых ученых МК-2699.2011.2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Викторова А.А., Жевакин С.А., Поглощение микрорадиоволн в воздухе димерами водяного пара, Доклады Академии наук СССР, (Физика) 1966, Том 171, №5. 1061-1064.
2. Кукин Л.М., Ноздрин Ю.Н., Рядов В.Я., Федосеев Л.И., Фурашов Н.И. Определение вклада мономеров и димеров водяного пара в атмосферное поглощение по данным измерений в диапазоне $\lambda = 1,15-1,55$ мм, Радиотехника и электроника, 1975, 20, №10, 2017-2025.
3. Liebe H. J. The atmospheric water vapor continuum below 300 GHz, Int. J. IR&MMW, 1984. V.5, pp. 207-227.
4. Борзов А.Б., Быстров Р.П., Дмитриев В.Г., Засовин Э.А., Потапов А.А., Соколов А.В., Чусов И.В. Радиолокационные системы: научно-технические достижения и проблемы развития техники ММ диапазона радиоволн // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2001. №5, с.3-49.
5. Rozenkranz P.W. Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models // Radio Sci. 1998. V.33, pp. 919-928.
6. Liebe H.J., Hufford G.A., Cotton M.G. Propagation Modeling of Moist Air and Suspended Water/Ice Particles at Frequencies Below 1000 GHz // AGARD Conf. Proc. 1993. V.542, pp. 3–10.
7. Kuhn T., Bauer A., Godon M., Buhler S., Kunzi K. Water vapor continuum: absorption measurements at 350 GHz and model calculations // J. Quantum Spectroscopy and Radiative Transfer. 2002. V. 74, pp. 545–562.
8. Meshkov A.I., De Lucia F.C. Broadband absolute absorption measurements of atmospheric continua with millimeter wave cavity ringdown spectroscopy // Rev. Sci. Instr. 2005. V. 76. 083103.
9. Паршин В.В., Третьяков М.Ю., Шанин В.Н., Шкаев А.П. Аппаратурный комплекс для прецизионного исследования распространения ММ и СубММ волн в атмосфере." 22 Всероссийская конференция по Распространению радиоволн (РРВ-22). п. Лучезарный 22 - 26 сентября. с. 258-261, 2008.
10. Tretyakov M.Yu., Krupnov A.F., Koshelev M.A., Makarov D.S., Serov E.A., and Parshin V.V. Resonator spectrometer for precise broadband investigations of atmospheric absorption in discrete lines and water vapor related continuum in millimeter wave range // Review of Scientific Instruments. 2009. V.80, pp. 093106-1-10.
11. Ma Q., Tipping R.H. A simple analytical parameterization for the water vapor millimeter wave foreign continuum // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., Vol.82, No.1-4, pp.517-531, 2003.

РАЗРАБОТКА ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО БЛОКА УСТРОЙСТВА КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

А.Д. СМОЛЯКОВ, И.Р. КАЮМОВ, А.В. КАРПОВ

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18,
E-mail: alex9975@gmail.com, Pnur655@mail.ru, Arkady.Karpov@ksu.ru*

В работе обосновывается выбор характеристик приемо-передающей аппаратуры для динамической генерации и распределения ключей симметричного шифрования. Принцип действия разрабатываемой аппаратуры основан на использовании случайности траектории распространения радиоволн в многолучевой среде. Разработанная аппаратура позволяет проводить когерентные измерения фазы несущей в гигагерцовом диапазоне, что дает возможность использовать её для технической реализации систем криптографической связи.

A.D. SMOLYAKOV, I.R.KAYUMOV, A.V. KARPOV

The report considers the reasons of characteristics choice of the receiving and transmitting equipment to dynamically generate and distribute symmetric encryption keys. The operating principle of the developed hardware is based upon a random trajectory of radio propagation in a multipath urban environment. The developed equipment provides coherent carrier phase measurements in the gigahertz frequency band and could be used for the technical implementation of cryptographic communication systems.

Генерация и распределение ключей шифрования/дешифрования между абонентами информационных систем является актуальной проблемой защиты информации. В связи с этим существует потребность в устройствах, осуществляющих данные операции [1].

Целью данной работы является обоснование выбора характеристик приемо-передающей аппаратуры для динамической генерации и распределения ключей симметричного шифрования. Принцип действия разрабатываемой аппаратуры основан на использовании случайности траектории распространения радиоволн в многолучевой среде [2]. Фаза и амплитуда принимаемого сигнала в такой среде будет также случайной величиной. Взаимность прямого и обратного распространения радиоволн позволяют считать одинаковыми фазы и амплитуды сигналов, регистрируемых на обоих концах радиоканала. В результате последовательности измерений случайной фазы многолучевого сигнала на двух концах радиолинии накапливаются два совпадающих набора случайных чисел. Последнее позволяет сформировать два экземпляра ключа симметричного шифрования. Для реализации изложенного способа генерации и распределения ключей требуется создать устройство, осуществляющее двусторонний обмен служебными сигналами, а также когерентные измерения их фазы на несущей частоте.

Достижение поставленной цели требует решение следующих двух основных задач:

- разработка приемо-передающего оборудования для системы криптографической связи (передатчика, приемника, модуля автоматического измерения фазы, антенного коммутатора, блока синтеза опорных частот);
- реализация когерентных измерений фазы несущей в гигагерцовом диапазоне;

На рисунке 1 представлена блок-схема разработанного приемо-передающего (ПП) блока. Блок функционально разделяется на три части: передающий тракт, приемный тракт и автоматизированный измеритель фазы, каждый из которых задействуется в зависимости от работы блока ПП либо в режиме передатчика, либо в режиме приемника.

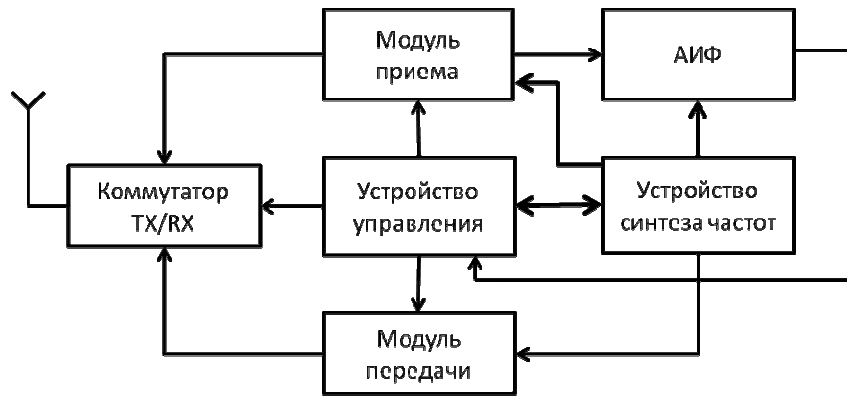


Рис. 1. Блок-схема приемопередающего блока

В состав передающего тракта входят: устройство синтеза частот, модуль передачи (МП), электронный антенный коммутатор, антенна. Приемный тракт содержит: антенну, электронный антенный коммутатор, модуль приема (МПР), устройство синтеза частот (УСЧ).

При установке блока в определенный режим работы устройство управления (УУ), реализованное на базе микроконтроллера, загружает в оперативную память необходимую подпрограмму управления, в соответствии с которой производится конфигурация узлов блока. Антенный коммутатор (АК) производит мультиплексирование антенны по времени между приемным и передающим трактами. Устройство синтеза частот выполняет функции подсистемы синхронизации всех функциональных узлов блока. Антенный коммутатор АК реализован на базе специализированной микросхемы мультиплексора. Микросхема АК управляется потенциалом, формируемым УУ. При подаче на вход управления АК высокого уровня происходит подключение антенны к выходу передатчика, а при подаче низкого уровня потенциала – к входу приемника соответственно.

Рассмотрим порядок работы ПП в режиме передатчика[5], реализация которого значительно проще, чем реализация режима приема. Переход ПП в режим передатчика начинается с подключения антенны к передающему тракту при помощи коммутатора АК, управляемого сигналом УУ. Функции управляемого задающего генератора выполняет УСЧ. Сгенерированный УСЧ зондирующий сигнал усиливается до необходимого уровня МП и через электронный коммутатор АК поступает на передающую антенну, а далее излучается в многолучевой радиоканал.

Режим приема служебных сигналов реализуется по схеме приемника супергетеродинного типа[4]. При этом электронный коммутатор АК подключает антенну к приемному тракту. С выхода АК принятый сигнал подается на вход МПР, состоящий из двух каскадов УВЧ, смесителя и усилителя промежуточной частоты (УПЧ). Сигнал ПЧ с выхода МПР, несущий информацию о случайной фазе принятого служебного сигнала, подается на модуль АИФ и сравнивается с опорным сигналом от УСЧ. На выходе АИФ образуется постоянный уровень напряжения U , пропорциональный разности фаз φ сигналов на двух его плечах. Образующийся постоянный уровень напряжения U оцифровывается с помощью интегрированного АЦП и записывается в память микроконтроллера УУ. В память УУ также закладывается характеристика управления АИФ $U(\varphi)$, позволяющая перевести записанный отсчет U в отсчет фазы принятого сигнала φ . Результирующий отсчет случайной фазы φ далее может быть записан в специальную область памяти для дальнейшего использования в целях генерации ключей симметричного шифрования.

Для реализации предусмотренных функций приемопередающего блока был разработан комплекс из семи подпрограмм управления, загружаемых в оперативную память УУ в зависимости от режима работы. Выбор режима может осуществляться при помощи управляющих клавиш блока. Обобщенная блок-схема алгоритма работы ПП представлена на рисунке 2. При включении устройства происходит начальная инициализация функциональных узлов, а также переход блока в режим генерации и передачи по многолучевому радиоканалу служебных сигналов на несущей частоте $f_0 = 952$ МГц.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы приемопередающего блока

При работе ПП-блока в режиме передатчика происходит отключение ряда устройств (УВЧ, УПЧ, смесителя, DDS-синтезатора), входящих в состав приемного тракта. Это позволяет повысить мощность передачи полезного сигнала за счет снижения общего токопотребления, а также существенно уменьшить эффект паразитной модуляции несущей частоты со стороны синтезаторов частот, входящих в состав приемного тракта. Режим передатчика может быть прерван внешним сигналом, в качестве которого могут выступать либо нажатия на управляющие клавиши, либо прием служебного сигнала от аналогичного приемопередающего блока. При регистрации внешнего сигнала происходит формирование определенного аппаратного прерывания и вызов подпрограммы его обработки.

В результате, разработан макет приемопередающего устройства, обладающего следующими техническими характеристиками:

- Чувствительность приемника: 5 мкВ.
- Диапазон принимаемых частот: 940 – 960 МГц
- Выходная мощность передатчика: от 1 до 30 мВт.
- Напряжение питания: от 6 В до 15 В по постоянному току.
- Потребляемый ток: не более 300 мА.
- Интерфейс управления/передачи данных: USB, UART.
- Частота снятия фазовых измерений: до 100 кГц;
- Точность измерения фазы: $\pm 8^\circ$ (при отношении (сигнал/шум) не менее 21 дБ и усреднении измерения фазы по 10 отсчетам);
- Шаг перестройки рабочей частоты: 0,1 МГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров В.В., Шерстюков О.Н., Сулимов А.И. Способ защиты информации. Заявка на изобретение № 2008152523, опублик. 10.07.2010 Бюл. № 19
2. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ / под ред. У.К. Джейкса. М.: Связь, 1979. 520 с.
3. Ньюмен Э., Массе С. Проектирование приемника для систем WIMAX с дискретизацией промежуточной частоты, полученной после двойного преобразования с понижением частоты / Под ред. Н. Хамзина: Пер. с англ. // Беспроводные технологии. – 2008, № 03. – с. 58-64.
4. Бобров Н.В. Радиоприемные устройства. Изд. 2-е, доп. М.: Энергия, 1976. 368 с.
5. Козырев В.Б. Радиопередающие устройства. 3-е, доп. М.: Радио и связь, 2003. 560 с.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОЛУЧЕВОГО РАДИОКАНАЛА

А.И. СУЛИМОВ, О.Н. ШЕРСТЮКОВ, А.Д. СМОЛЯКОВ,
А.В. КАРПОВ, В.В. СИДОРОВ

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18,
E-mail: Amir.Sulimov@ksu.ru, Oleg.Sherstyukov@ksu.ru, alex9975@gmail.com,
Arkady.Karpov@ksu.ru, Vladimir.Sidorov@ksu.ru*

Предлагается динамическая компьютерная модель многолучевого радиоканала, позволяющая в реальном масштабе времени моделировать амплитудно-фазовые вариации сигнала, возникающие при перемещениях приемного устройства в городской среде. Модель основана на геометрическом подходе, оперирующем пространственным распределением рассеивателей в среде, что позволяет осуществлять двустороннее моделирование радиоканала. Предложенная модель может быть использована для исследования криптографических приложений физических свойств многолучевого распространения радиоволн.

A.I. SULIMOV, O.N. SHERSTYUKOV, A.D. SMOLYAKOV,
A.V. KARPOV, V.V. SIDOROV

The paper proposes a dynamic computer model of the multipath channel, which allows real-time modeling of amplitude-phase variations of the signal arising from the movements of the receiver in an urban environment. The model is based on a geometrical approach, operating by the specified spatial distribution of scatterers in a multipath urban medium, and allows the simulation of two-way radio communication. The proposed model can be used to research the possible cryptographic applications of the physical properties of multipath radio propagation.

Введение

Проблема распределения ключей шифрования в симметричных криптосистемах является одной из центральных проблем современной криптографии [1]. В работах [2–4] был предложен оригинальный способ генерации и дистанционного распределения криптографических ключей на расстояния до 2000 км, основанный на физических свойствах метеорного распространения радиоволн – «метеорная криптография». Способ основан на случайности траектории и двусторонней взаимности метеорного распространения радиоволн. Исследования показывают, что подобными свойствами обладает и многолучевой радиоканал в городской среде. В результате интерференции парциальных лучей от случайно распределенных в пространстве рассеивателей принимаемый сигнал приобретает случайную амплитуду и фазу, значения которых согласно теореме взаимности электродинамики, будут совпадать на обоих концах радиолинии. Эти свойства позволяют, наблюдая за случайными характеристиками многолучевого сигнала, регистрировать на двух пунктах мобильной связи два совпадающих набора случайных чисел. Регистрируемые измерения используют далее для формирования двух экземпляров ключа симметричного шифрования информации.

Для исследования возможных криптографических приложений многолучевого распространения радиоволн требуется построить имитационную модель радиоканала, позволяющую воспроизводить амплитудно-временные и фазово-временные характеристики сигнала (АВХ и ФВХ), регистрируемые синхронно на обоих концах радиолинии. При этом важно оценить степень их симметрии, которая может нарушаться при быстром перемещении мобильного средства связи (мобильного терминала, МТ) в многолучевой среде или в результате воздействия шумов. Указанные особенности предопределили необходимость создания геометрической модели динамической многолучевости в городской среде.

Имитационная модель

В качестве исходного пространственного распределения рассеивателей в многолучевой среде за основу была принята модель Понамарева-Куликова-Тельпуховского [5]:

$$w(r, \varphi) = \frac{\nu}{2} \cdot \sin^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) \left[\frac{hr}{z_2 \bar{\rho}} (r + \tilde{r}) e^{-\gamma_0 (\tilde{r} + r \frac{h}{z_2})} + \frac{z_2 - h}{h} \tilde{r} e^{-\gamma_0 r} \right], \quad (1)$$

где ν [зд./км²] – плотность городской застройки,

h – средняя высота зданий,

$\bar{\rho}$ [М] = $\gamma_0^{-1} = \frac{\pi}{2\nu \langle L \rangle} \cdot \frac{z_2 - z_1}{h - z_1}$ – средняя дальность прямой видимости,

$\langle L \rangle$ – средняя протяженность зданий,

z_1, z_2 – высоты приемной и передающей антенн,

r – расстояние от передатчика (базовой станции, БС) до рассеивателя,

\tilde{r} – расстояние от приемника до рассеивателя,

α – угол рассеяния (см. рис.1).

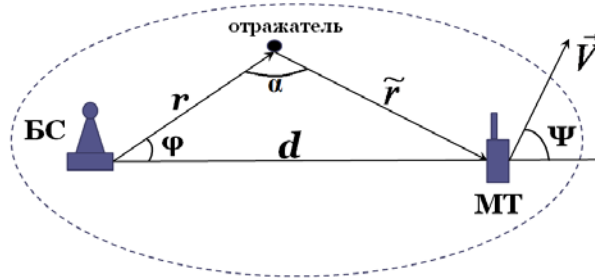


Рис. 2. Геометрия модели радиоканала

Если передатчик излучает монохроматический гармонический сигнал с частотой $f = \omega/2\pi$, то принимаемый многолучевой сигнал может быть записан в форме (2):

$$S(t) = \sum_{i=0}^N A_i e^{j(\varphi_i + \omega_{di} \cdot t)} \cdot e^{j\omega t} + n(t) = x_c(t) + i \cdot x_s(t), \quad (2)$$

где N – количество парциальных лучей (нулевой индекс соответствует сигналу прямой видимости), A_i – амплитуда сигнала в i -м луче, φ_i – фаза i -го луча,

$\omega_{di} = 2\pi \frac{V}{c} (\cos \alpha_i \cos \psi + \sin \alpha_i \sin \psi)$ – доплеровский сдвиг частоты, вызванный перемещением

приемника со скоростью V , α_i – направление на отражатель, c – скорость света, $n(t)$ – шум на входе приемника, $x_c(t)$ и $x_s(t)$ – синфазная и квадратурная составляющие сигнала соответственно. Как следует из формулы (2), квадратурные компоненты $x_c(t)$ и $x_s(t)$ могут быть представлены в форме (3), что позволяет определить фазу φ и амплитуду A результирующего многолучевого сигнала соотношениями (4).

$$\begin{cases} x_c(t) = \sum_{i=0}^N A_i \cos(\varphi_i + \omega_{di} \cdot t) + n(t) \cdot \cos(\omega t) \\ x_s(t) = \sum_{i=0}^N A_i \sin(\varphi_i + \omega_{di} \cdot t) - n(t) \cdot \sin(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

$$A = \sqrt{x_c^2 + x_s^2}, \quad \text{tg } \varphi = \frac{x_s}{x_c} \quad (4)$$

В рамках предложенной модели каждый парциальный луч характеризуется следующим набором величин:

- A_i – амплитуда сигнала;
- $\{r_s, \alpha_s, h_s\}$ – цилиндрические координаты отражателя, определенные в системе координат, связанной с передатчиком (базовой станцией);

- $t_p = \frac{r + \tilde{r}}{c}$ - время распространения луча;
- $\varphi = 2\pi[f \cdot t_p]$ - фаза сигнала в парциальном луче, где $[x]$ – целая часть числа x ;
- t_a – время возникновения луча;
- τ – задержка луча по отношению к предыдущему лучу;
- $\tilde{\tau}$ – «время жизни» луча (время незатенения рассеивателя).

При перемещениях МТ в многолучевой среде перечисленные характеристики каждого парциального луча подвержены изменениям. Кроме того, многолучевая структура сигнала также претерпевает изменения в силу регулярных исчезновений текущих и возникновений новых лучей, связанных с нарушениями прямой видимости на рассеиватель из точек приема и передачи при перемещениях МТ. Согласно [5], исчезновение и возникновение парциальных лучей можно рассматривать как пуассоновский процесс, что приводит к экспоненциальным законам распределения времени межлучевой задержки τ и «времени жизни» луча $\tilde{\tau}$:

$$\begin{cases} P(M) = \frac{(\mu T_H)^M}{M!} e^{-\mu T_H} \\ w(\tau) = \mu e^{-\mu\tau}, \\ w(\tilde{\tau}) = \frac{1}{\langle \tilde{\tau} \rangle} e^{-\tilde{\tau}/\langle \tilde{\tau} \rangle} \end{cases}, \quad (5)$$

где M – полное количество лучей, реализовавшихся за время наблюдения T_H , $\mu = \bar{N} \frac{V}{\bar{l}}$ – интенсивность возникновения лучей, $\langle \tilde{\tau} \rangle = \frac{\bar{l}}{V}$ – среднее «время жизни» лучей, \bar{N} – среднее количество одновременно наблюдаемых лучей, \bar{l} – радиус крупномасштабной корреляции принимаемого сигнала, определяемый при смещении вдоль направления φ_0 формулой (6):

$$\bar{l} = \frac{2 \langle L \rangle}{\pi \gamma_0 |\sin \varphi_0|}, \quad \bar{l} \leq \bar{\rho}. \quad (6)$$

Результаты моделирования

На рис. 2 представлена динамика изменения количества лучей, полученная при моделировании движения мобильного терминала со скоростью 30 м/с в многолучевой среде с $\bar{N} = 12$ лучами. Как видно из рис. 2, мгновенное количество лучей претерпевает существенные изменения, варьируясь в пределах $N \in [\bar{N} - 10, \bar{N} + 10]$.



Рис.3. Изменение численности парциальных лучей при движении со скоростью $V = 30$ м/с

Амплитуда парциальных лучей A_i может быть описана логнормальным распределением, математическое ожидание которого определяется потерями мощности сигнала L [дБ] при распространении в многолучевой среде, а дисперсия σ обычно изменяется в диапазоне 4 – 11 дБ и зависит от типа местности. Для прогнозирования значений потерь мощности L и дисперсии σ может быть использована усовершенствованная модель Хата (COST-231 Hata Model) [6], справедливая в широком диапазоне частот до 2 ГГц, удалениях до 20 км от передатчика и высотах подвеса передающей антенны до 200 м.

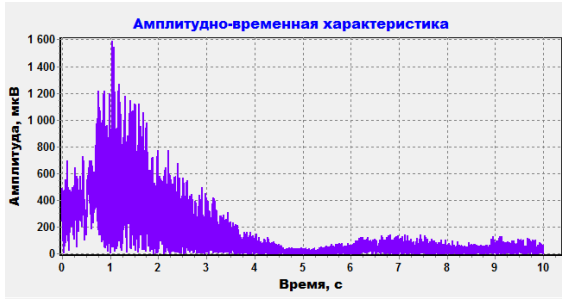


Рис. 3,а. Модельная АВХ сигнала при движении со скоростью $V=30$ м/с, $P_T=2$ Вт

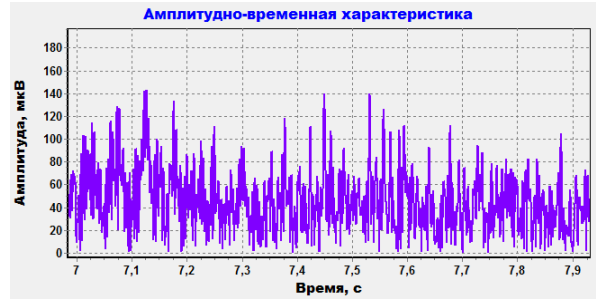


Рис.3,б. Медленные замирания модельной АВХ при движении со скоростью $V=30$ м/с, $P_T=2$ Вт

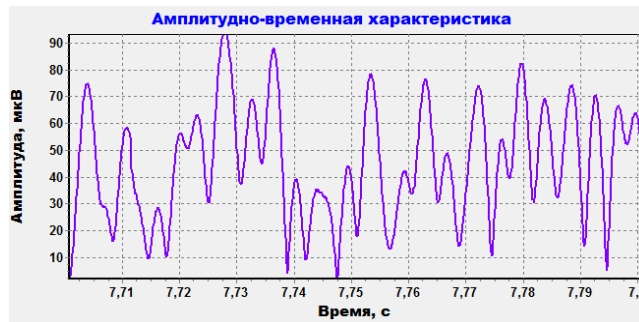


Рис. 3,в. Быстрые замирания модельной АВХ при движении со скоростью $V=30$ м/с, $P_T=2$ Вт

На рис. 3(а,б,в) представлены АВХ многолучевого сигнала, полученные при моделировании движения МТ со скоростью $V = 30$ м/с перпендикулярно вниз ($\Psi = 270^\circ$) от направления на БС, построенные в различных масштабах по горизонтальной оси времени. На рис. 3,б проявляются медленные замирания уровня сигнала, имеющие логнормальную плотность распределения с $\sigma = 11$ дБ по мощности. На рис. 3,в отчетливо видны быстрые замирания сигнала, подчиняющиеся распределению Рэля-Райса и имеющие характерный масштаб периодичности, близкий к $\lambda/2$.

На рис. 4 (а,б) представлены ФВХ сигнала и нормированная автокорреляционная функция (АКФ) фазы соответственно. Из рис. 4 следует, что на малых временных масштабах изменения фазы, хотя и являются случайными, но имеют плавный характер. Как следует из профиля АКФ фазы (рис.4,б), для возможности формирования ключей симметричного шифрования из измерений случайной фазы многолучевого сигнала необходимо увеличить интервал снятия измерений $\Delta t_{\text{изм}}$ до величины порядка 10 мс. В этом случае измерения окажутся взаимно некоррелированными, а распределение фазы примет равномерный характер на всем интервале изменения $\varphi \in [0^\circ, 360^\circ]$, что позволит достичь необходимой стойкости шифрования информации.

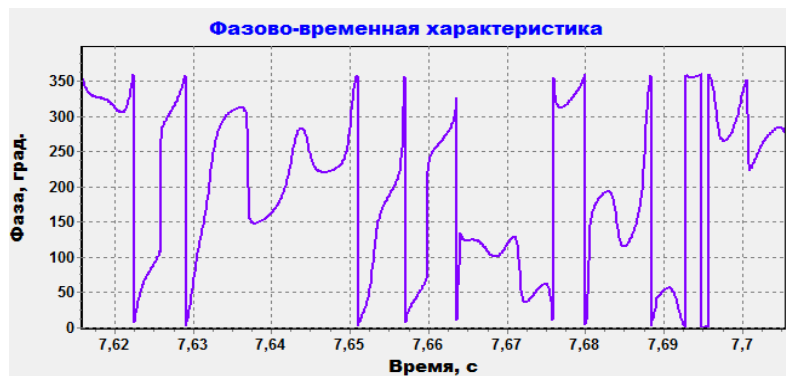


Рис. 4,а. Модельная ФВХ сигнала при движении со скоростью 30 м/с

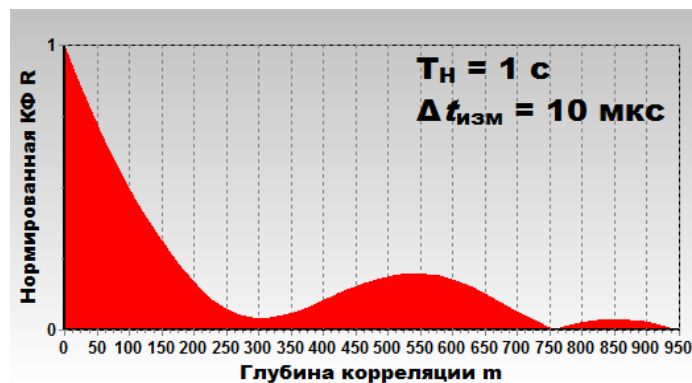


Рис. 4,б. АКФ фазы при движении со скоростью 30 м/с и периодичностью снятия измерений $\Delta t_{\text{изм}} = 10 \text{ мкс}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Смарт Н. Криптография. М.: Техносфера, 2005. 528 с.
2. Сидоров В.В., Карпов А.В., Сулимов А.И. Метеорная генерация секретных ключей шифрования для защиты открытых каналов связи // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2008. – № 03. – С. 45-54.
3. Карпов А.В., Сидоров В.В. Способ защиты информации в метеорном радиоканале путём шифрования случайным природным процессом. Патент на изобретение RU №2265957, приоритет от 25.02.2004, опубл. 10.12.2005, Бюлл. №34. – 7 с.
4. Сидоров В.В., Карпов А.В., Сулимов А.И. Способ защиты информации. Патент на изобретение RU №2370898, приоритет от 05.09.2007, опубл. 20.10.2009, Бюлл. №29. – 11 с.
5. Пономарев Г.А., Куликов А.М., Тельпуховский Е.Д. Распространение УКВ в городе. Томск: МП «Раско», 1991, 223 с.
6. COST231. Digital mobile radio towards future generation systems. Final report, 1999. 474 pp.