

4. Kovalev V.I., Ali M., Kovalev S.V., Kovalev V.V. Possibilities of achromatization of coaxial asymmetric phase shifters with an even number of reflections // Opt. and Spectr. 2014, V. 117, No. 1, P. 118-120.
5. Kovalev V.I., Rukovichnikov A.I., Mikhruan F.A., Kovalev V.V., Kovalev S.V. Automatic light-ion photometer - refractometer for the study of liquid media. Reports MNTROES them. A.S. Porova. Serie: Problems of ecoinformatics, Issue XII, Moscow, 2016, p. 215-216.
6. Suzuki M., Hamamura K., Kotani T. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1995, V.66, P.1589.
7. Bruce M. Pritchop, John E. Greivenkamp. Automated measurement of the refractive index of fluids APPLIED OPTICS, Vol. 47, No. 10, 1504, 2008.


  
**О ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛН ЛЕСНЫМ ПОЛОГОМ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ДЕЦИМЕТРОВОМ И МЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ.**

А.Г. Гранков, А.А. Мильшин, А.А. Чуханцев

Институт радиотехники и электроники РАН,  
141120, г. Фрязино, Московской обл., пл. ак. Введенского, д.1,  
тел. 526-9150, e-mail: amilshin@ms.ire.rssi.ru

Рис.

**METHOD OF IN SITU SPECTRAL MEASUREMENTS OF RADIOWAVE ATTENUATION IN A FOREST CANOPY WITH USE A COSMIC RADIATION AT L-, P-BAND.**

А.С. Гранков, А.А. Мильшин, А.А. Чуханцев

Классические радиоволновые методы измерения интегрального ослабления  $T_C$  радиоволн пологом леса предполагают размещение передающей антенны над пологом и приемной антенны под пологом для случая вертикального зондирования либо расположение обеих антенн на уровне крон деревьев в случае наклонного и торизонтального зондирования. Поскольку лесной полог располагается на высоте  $10 \div 25$  м, то возникают технические и экономические сложности в проведении масштабных (длительных по времени и в разных лесных зонах) спектральных измерений. В данной работе анализируется возможность использования космического радиоизлучения (КРИ) для определения характеристик ослабления лесного полога в диапазоне  $20 \div 300$  см

КРИ состоит из распределенного радиоизлучения межзвездного газа; радионизлучения дискретных источников с угловыми размерами от единиц угловых секунд до десятков угловых минут и монохроматического радиоизлучения нейтрального водорода. Для рассматриваемой задачи представляет интерес распределенное радиоизлучение, состоящее из изотропного реликтового излучения интенсивностью  $2.7$  К и распределенного радиоизлучения Галактики и Метагалактики, а также радиоизлучение дискретного источника - Солнца. В качестве исходных данных для расчета распределенного радиоизлучения используются результаты экспериментальных измерений яркостной температуры (ЯТ) небосвода на частоте  $f_1 = 404$  МГц [1]. Пересчет ЯТ на другие частоты  $f$  осуществляется с учетом известной в радиоастрономии частотной зависимости:

$$T_{COS}^{BT}(f) = T_{COS}^{BT}(f_1) \cdot [f_1/f]^\alpha, \quad (1)$$

где спектральный индекс  $\alpha$  может изменяться от  $2.3$  до  $2.8$  [2]. В качестве примера, на рис.1 представлены результаты расчета суточной динамики КРИ в случае наблюдения в зенит для Московской области в диапазоне волн  $20 \div 300$  см с использованием данных [1] и соотношения (1). Суточные вариации ЯТ в рассматриваемом диапазоне составляют  $2 \div 1230$  К. При направлении антенны на центр Галактики, уровень излучения будет существенно выше.

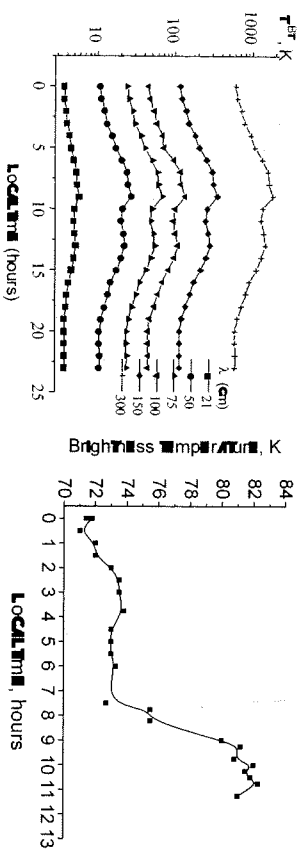


Рис.1.

Рис.2.

Радионизлучение Солнца (угловой размер около  $\theta \sim 0,5^\circ$ ) имеет две составляющие – тепловое радионизлучение спокойного Солнца и нетепловое, спорадическое радионизлучение. ЯТ излучения спокойного Солнца достаточно хорошо аппроксимируется соотношением [3]:  $T_S^{BT} [K] \approx 5 \cdot 10^5 \lambda [m]$ . Спорадическое радионизлучение значительно интенсивнее теплового и в метровом диапазоне может достигать миллиардов кельвинов.

Влияние диаграммы направленности антенны на величину измеряемого КРИ можно оценить с помощью соотношения:

$$T^A = \frac{\eta}{4\pi} \int_{\Omega} T_S^{BT}(\Omega) D(\Omega) d\Omega, \quad (2)$$

где  $T^A$  - измеряемая антенная температура,  $D(\Omega)$  - нормированная диаграмма направленности,  $\eta$  коэффициент полезного действия антенны,  $T_S^{BT}(\Omega)$  – угловое распределение ЯТ космического излучения. В случае измерений с широко направленными антеннами уровень случайных вариаций ЯТ космоса будет ниже из-за эффекта антенного сглаживания. Влияние антенного сглаживания иллюстрирует экспериментальная зависимость ЯТ космоса на волне 60 см при ширине главного лепестка антенны около  $30^\circ$  (рис.2) для Московской области. Измерения были выполнены с помощью радиометра ПК7-15 и направленной в зенит антенны П6-33.

Для дискретных источников ( $\Omega_{COS} \ll \Omega_A$ ) выражение (2) упрощается:

$$T^A = T^{BT} \Omega_{COS} / \Omega_A = T^{BT} F_\beta, \quad (3)$$

где  $F_\beta$  - коэффициент заполнения луча. Для того, чтобы сгладить влияние пространственной неоднородности лесного полога и проводить измерения в зоне Фраунгофера, необходимо применять антенны с шириной главного лепестка  $10 \div 40^\circ$ . Оценки величины  $T^A$  спокойного Солнца были выполнены для случая применения измерительных широкополосных антенн П6-23 и П6-33. Результаты

оленок приведены в таблице 1, здесь  $\theta_E$  - ширина главного лепестка в плоскости  $E$ ,  $G$  - коэффициент усиления антенны.

Таблица 1.

$\lambda$ , см	$\theta_E$ , град.	$G$	$F_\beta$	$T^A$ , К
15	28	8,4	4,53E-05	3,4
30	35	7,20	3,9E-05	5,8
37,5	22	11,50	6,22E-05	11,7
75	35	7,20	3,9E-05	14,6
150	58	3,98	2,15E-05	16,2
300	55	1,55	8,39E-06	12,6

В случае применения узкополосных антенн с шириной лепестка до  $10^\circ$  величина солнечного подвоя возрастает более чем на порядок и поэтому радионизлучение Солнца можно использовать как внешний генератор. При применении широкополосных антенн прямое излучение Солнца следует рассматривать как дополнительный источник радиопомех с указанной в табл. 2 интенсивностью.

Принимаемое антенной КРИ  $T_\Sigma^{BT}$  может быть представлено соотношением:

$$T_\Sigma^{BT} = T_C (1 - \exp(-\tau_C)) + T_{COS}^{BT} \exp(-\tau_C) \quad (4)$$

$T_{COS}^{BT}$  состоит из неполяризованной и поляризованной компонент  $T_{COS}^{BT}$ . При прохождении радиоволны через ионосферу происходит поворот плоскости поляризации излучения за счет магнитного поля Земли (эффект Фарадея). Полный угол поворота плоскости поляризации на расстоянии  $L$  в рассматриваемом диапазоне волн определяется как [7]:

$$\Omega_F = e^3 / (2\pi f^2 m^2 c^2) \int_0^L N_0 \cos \alpha N_e(l) dl,$$

где  $e$ ,  $m$  - заряд и масса электрона,  $c$  - скорость света,  $N_0$  - напряженность магнитного поля Земли,  $\alpha$  - угол между направлением распространения волны и магнитным полем Земли,  $N_e$  - концентрация электронов. При использовании антенн с линейной поляризацией из-за эффекта Фарадея будет наблюдаться ошибка в измерении ЯТ, которую можно оценить как:

$$\Delta T_{HP}(\Omega_F) = \pm (T_{COSV}^{BT} - T_{COSH}^{BT}) \sin^2(\Omega_F),$$

где знаки «+» и «-» относятся, соответственно, к Н-горизонтальной и V-вертикальной поляризации,  $\Omega_F$  - фарадеевское вращение. Оценки показывают, что

Максимальные значения  $\Omega_F$  составляют  $30 \div 670^\circ$  в диапазоне волн  $20 \div 300$  см. Оценить величину  $(T_{\text{COSV}}^{VT} - T_{\text{COSH}}^{VT})$  расчетным путем сложно, т.к. в диаграмму направленности антенны попадают участки небосвода с различным уровнем поляризованного излучения, поэтому предпочтительнее использовать данные экспериментальных измерений.

Методика измерений характеристик ослабления пологом леса сводится к измерению космического фона  $T_{\Sigma 1}^{VT}$  под пологом и с рядом находящихся открытым местом  $T_{\Sigma 2}^{VT}$  теми же измерительными средствами в одно и то же время суток либо к измерению фона под пологом в разное время суток. Величина интегрального поглощения определяется в этом случае исходя из соотношения (4) как:

$$T_C = -\ln(T_{\Sigma 1}^{VT} - T_C) - \ln(T_{\Sigma 2}^{VT} - T_C), \quad (5)$$

$T_C$  определяется по измерениям температуры воздуха в пологе. Были выполнены измерения интегрального поглощения густой кроной 35-летней ели на волнах 21 и 43 см. Диаграмма направленности антенн радиометра полностью перекрывает крону, величина поглощения с использованием соотношения (5) составила 0,36 и 0,52 Нп.

Величина погрешности определения  $T_C$  характеризуется соотношением  $\delta T_C = 2\delta T_{\Sigma}^{VT} / T_{\Sigma}^{VT}$ , где величина  $\delta T_{\Sigma}^{VT}$  составляет не менее 5 К. При  $T_C = 0,2$  погрешность составляет  $\delta T_C \geq 0,2$ , что ограничивает применимость рассматриваемого подхода в дециметровом диапазоне, в метровом диапазоне возможны измерения и при меньших значениях  $T_C$ .

Применимость рассматриваемого метода зависит от величины слагаемого  $T_{\text{COS}}^{VT} \exp(-T_C)$  в соотношении (4), которая должна превышать ошибку измерения, т.е.  $> 5$  К. Диапазон изменения величины  $T_C$  можно определить исходя из экспериментальных измерений. В работах [4,5,6] анализировались экспериментальные данные об интегральном поглощении пологом. Величина  $T_C$  для крон одиночных лиственных и хвойных деревьев достигает  $0,5 \div 0,8$  Нп, а для сплошного густого лиственного полога -  $0,6 \div 1$  Нп на волне 30 см. Спектральные зависимости ослабления радиоволн пологом описываются соотношением вида  $T_C = A \cdot f^B$  [8,9].

Измерения ослабления кронами одиночных деревьев в диапазоне частот  $0,476 - 2,1$  ГГц выполнены в работе [8]. Величина ослабления  $T = \exp(-T_C)$  в указанном диапазоне изменялась от 3 до 13 дБ ( $T_C = 0,7 - 3$  Нп) для хвойного дерева и от 6 до 16 дБ ( $T_C = 1,4 - 3,6$  Нп) для лиственного дерева.

Для лесного полога при наклонном зондировании величина  $T_C$  изменяется от 3 до 30 Нп в диапазоне  $0,1 - 1$  ГГц [9].

#### Заключение.

Рассмотрена возможность использования КРИ в качестве внешнего источника излучения (генератора) для проведения спектральных измерений ослабления радиоволн лесным пологом, что обусловлено ростом интенсивности КРИ пропорционально частоте со спектральным индексом от 2,3 до 2,8 и ростом ослабления в лесном пологе со спектральным индексом менее 1,5. Использование радионизлучения Солнца возможно для антенн с шириной главного лепестка менее  $10^\circ$ . КРИ целесообразно применять на волнах длиннее 50 см. Для ослабления влияния эффекта Фарадея целесообразно использовать антенны с круговой поляризацией.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ, грант № 2059.

#### Литература

1. *Rawlin-Tonh I.K., Shakeshaft J.R.* A survey of the background radiation at a frequency of 404 MHz. - Mon. Not. Roy. Astr. Soc., 1962, v.124, № 1, p. 61.
2. *Milner M.E.* Метод и результаты построения радиокарт неба посредством интерполяции по частоте с коррекцией спектральных индексов на основании проведенных абсолютных измерений // Горький, Препринт НИРФИ №231, 1987, 55с.
3. *Железняков В.В.* Радионизлучение Солнца и планет. - М.: Наука, 1964, 560 с.
4. *Wegmiller U., Metzler S. and Njoku E.* Saporu orasity models// ESA/NASA International Workshop, VSP, V.I. Choudhury, J.N. Kett, E.G. Njoku and P. Rapraioni. 1994, P.375-387.
5. *Milshin A.A., and Grankov A.G.* Some Experimental Results of Microwave Emission of Forest in L-band// Issledovaniya Zemli iz kosmosa (Research Earth from Space), 2000, № 3, P.50-57.
6. *El-Rayes M.A., Ullaby F.T.* Microwave Dielectric Spectra of Vegetation-Part I: Experimental Observations// IEEE Trans. On Geosci. And Rem. Sens., Vol. GE-25, No.5, 1987, 541-549.
7. *Кравайце Ю.А., Фаизуллин З.И., Виноградов Ф.Г.* Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. М.: Радио и связь, 1983, 224 с.
8. *Виноградова Т.О., Головаев С.П., Гранков А.Г., Мильшин А.А., Прудко А.В., Чухлицев А.А., Шелобанова Н.К., Шутко А.М.* Спектральные измерения ослабления радиоволн кронами ели и каштана (см. настоящий сборник).
9. *Чухлицев А.А., Головаев С.П.* Оценки затухания радиоволн диапазона 3 - 300 см в растительных покровах// Лесной вестник, МГУЛ: 2002, №1(21), с.112-117.