

## **Применение тороидальной антенны T-55 в СВЧ-комплексах картирования собственного излучения подстилающих поверхностей с борта БПЛА**

Ю. В. Рыбаков, В. А. Воронин, О. А. Герасимов, Д. В. Дроздов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова», 194021 Санкт-Петербург ул. Карбышева д. 7, y.rybakov@mail.ru*

*В работе рассмотрены возможности применения тороидальной системы T-55 в составе бюджетных комплексов СВЧ-радиометрического картирования с борта БПЛА. Экспериментально измерены диаграммы направленности для 8-10-лучевой антенны в Ku диапазоне и 4-лучевой антенны в C-диапазоне. Минимальные габариты 670x680x330 мм. Вес собственно антенны 5 кг.*

*The paper considers the means of toroidal T-55 system use for drone-based low-cost microwave surface mapping. 8-10-beam Ku band antennae and 4-beam C band antennae experimental radiation patterns are shown. Minimal system dimensions are 670x680x330 mm. Antenna weight is 5 kg.*

Технологии дистанционного зондирования подстилающей поверхности бурно развивались на протяжении последних десятилетий [1], преимущественно в расчёте на использование ИСЗ. Однако, разрешающая способность, достигаемая зондированием со спутника в СВЧ диапазоне, составляет порядка 10-100 км, что недостаточно для многих прикладных задач. Чрезвычайно актуальные на сегодня задачи раннего обнаружения очагов лесных и торфяных пожаров [2], влажностного зондирования почвы [3], ледовая разведка требуют разрешающей способности на уровне 10-100 м, что, в свою очередь, требует размещения измерительных средств не выше 50-300 м над поверхностью. Такую высоту наблюдения способны обеспечить современные БПЛА малого и среднего классов, выгодно отличающиеся от других типов авианосителей ценой, экономичностью, простотой обслуживания.

Однако, ограниченная грузоподъёмность наиболее доступных моделей БПЛА (10-30 кг), как и существенная обратная зависимость между полезной нагрузкой и продолжительностью полёта, выдвигает на первый план задачу снижения веса системы, а также её габаритов. Кроме того, сравнительно низкая надёжность БПЛА, риск случайной потери вынуждает пользователя иметь в запасе как несколько БПЛА, так и несколько комплектов радиометрической аппаратуры, которая, соответственно, должна быть в разы дешевле стационарной.

Для повышения информативности и практической значимости результатов наблюдений желательно их проведение в режиме картирования поверхности. Обеспечить такой режим можно либо через последовательное сканирование управляемым лучом, либо посредством многолучевой антенны. Первый вариант в данной работе не рассматривается как заведомо противоречащий идее удешевления и упрощения системы. Анализируется техническая возможность применения многолучевой антенны для наблюдения в диапазоне Ku, а также C.

### **Тороидальная двухзеркальная система приёма спутникового телевидения T-55**

В качестве доступного образца многолучевой антенны рассмотрим тороидальную антенну T-55, выпускаемую серийно фирмой Wavefrontier Co Ltd [4].

Привлекательным фактором с точки зрения аэродинамики являются её габариты (670 × 680 × 330 мм), они меньше, чем, например, у антенны T-90 того же производителя. Вес антенны без крепёжных элементов – всего 5 кг.

Антенна спроектирована для одновременного приёма сигналов Ku-диапазона с восьми спутников, расположенных в угловом секторе  $\pm 30^\circ$ . Соответственно, направив её в нади́р, можно получить эффект восьмилучевого дистанционного зондирования.

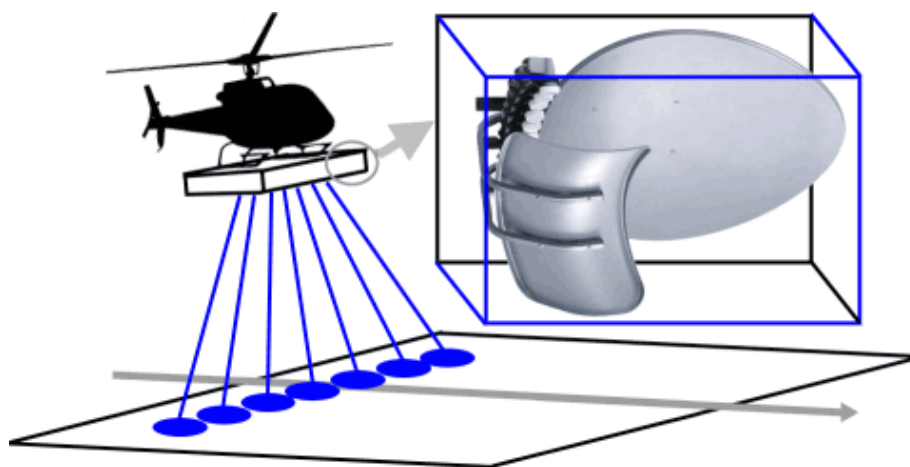


Рис. 1. Общий вид антенны при работе с радиометром.

Облучатель, располагаемый на фокальной линии антенны, должен обеспечить засветку краёв эллиптического вспомогательного зеркала в угловом секторе  $75^\circ$ . Уровень засветки при использовании стандартных облучателей диапазонов Ku и C составляет  $\sim 9-12$  дБ для разных точек диапазона.

В качестве облучателей для реализации приёмной схемы целесообразно использовать готовые конвертеры Ku-, C- или S-диапазонов. Они выпускаются крупными партиями, отчего их рыночная цена в десятки и даже сотни раз ниже, чем, например, цена конвертера L-диапазона. Особенно широк ассортимент устройств диапазонов Ku (10.7–12.7 ГГц) и C (3.4–4.2 ГГц); на рынке представлены модели как для приёма отдельных линейных поляризаций, так и для круговой, а также модели для одновременного приёма в обоих диапазонах. Достаточно широк и выбор геометрии корпусов в плане удобства крепления.

Для спутникового телевидения активно используются следующие диапазоны

Ku диапазон 10.7-12.7 ГГц

C диапазон 3.4-4.2 ГГц

S диапазон 2.5-2.7 ГГц

В этих диапазонах, особенно в Ku и C существует огромное количество приёмных модулей. При этом ключевая характеристика приёмников – шумовая температура  $T_{ш}$  – практически всеми производителями доведена до значений, предельно достижимых в устройствах без принудительного охлаждения, и составляет 15-20 К

### **Трассовая система на базе Т-55 для БПЛА в Ku диапазоне**

Поскольку сведения о характеристиках антенны в технической документации изготовителя приведены в самом общем виде, были измерены диаграммы направленности в Ku диапазоне на  $f = 12,075$  ГГц при размещении LNB блоков в стандартных держателях вдоль фокальной линии Т-55 почти вплотную друг к другу. Это позволяет сформировать не восемь, а десять лучей, которые показаны на рис. 2.

Диаграммы имеют чётко сформированный главный лепесток и пересекаются по уровню примерно -3 дБ. В табл. 1. приведены параметры всех диаграмм для различных точек установки на фокальной оси.

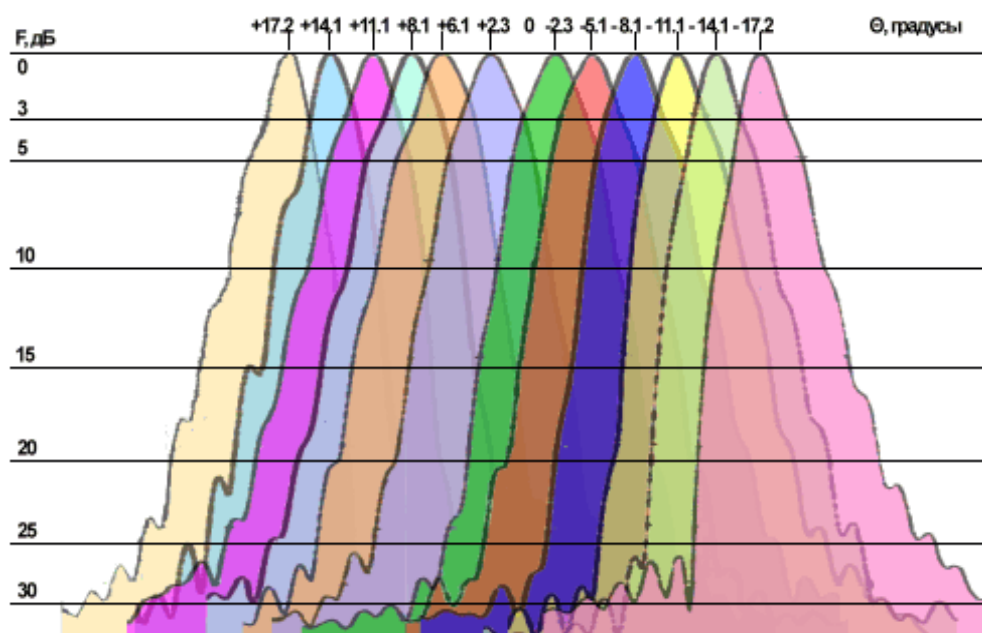


Рис. 2. Диаграммы Ку.

Таблица 1.

	+17.2	+14.1	+11.1	+8.1	+6.1	+2.3		-2.3	-5.1	-8.1	-11.2	-14.1	-17.2
-3	3.3	3.6	4.0	4.6	4.6	5.0		4.8	4.6	4.4	4.1	3.4	3.2
-5	5.4	5.5	6.1	6.6	6.6	6.7		6.6	6.6	6.5	6.2	4.6	5.1
-10	8.0	8.1	8.4	9.4	9.2	9.2		9.2	9.3	8.8	8.8	7.9	7.9
-15	10.8	10.8	11.2	12.1	12.2	12.2		12.0	12.4	11.7	11.4	9.2	10.8
-20	13.5	12.6	13.8	14.6	13.9	13.8		14.0	14.0	14.6	14.0	12.3	13.4
-25	16.0	15.6	15.6	16.6	17.4	17.4		16.8	17.9	16.6	17.4	15.3	14.8
-30	20.0	18.2	19.4	20.0	21.8	21.8		20.2	20.6	20.0	18.8	16.3	17.2

### Т-55 со стандартным С рупором в качестве облучателя.

Стандартный С рупор (рис. 3) предназначен для использования в диапазоне спутникового телевидения  $f = 3.4-4.2$  ГГц и имеет апертуру 160 мм. Для примера на рис. 4 приведены диаграммы С-рупора на  $f = 3.93$  ГГц. В секторе  $\sim 75^\circ$  уровень облучения составляет порядка -10 дБ и таким образом данный рупор можно использовать в качестве облучателя Т-55. С-рупор был установлен в положение, близкое к центру антенны. Пунктиром показано теоретическое значение уровня облучения для угла  $75^\circ$ , которое составляет 11,7 дБ. На рис. 5 приведены диаграммы направленности Т-55 на  $f = 3.93$  ГГц и  $f = 4.2$  ГГц при использовании в качестве облучателя стандартного С-рупора.

Экспериментальное исследование диаграмм направленности в диапазоне частот  $f = 3.95-4.5$  ГГц показало, что С рупор может быть использован в качестве облучателя, тем более что имеются модификации по одновременному приёму на двух поляризациях и вариант по работе в двух диапазонах С и Ку.

Главный недостаток С-рупора - большой вес и неудобство крепления на Т-55 минимум четырёх рупоров для формирования четырёх разнесённых в пространстве лучей.



Рис. 3. Стандартный С-рупор.

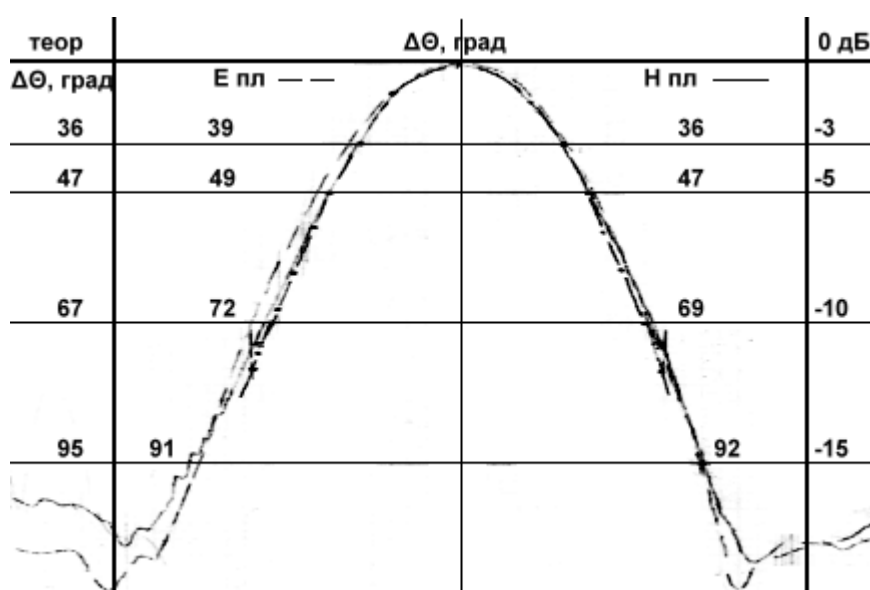


Рис. 4. Диаграммы С-рупора на  $f = 3.93$  ГГц.

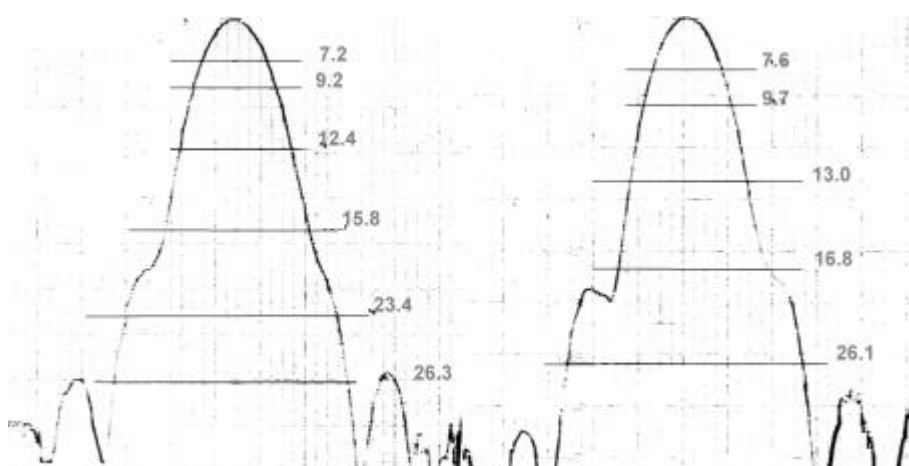


Рис. 5. Диаграммы направленности Т-55 с С-рупором для двух частот.

#### Т-55 с пятиэлементным печатным облучателем

Печатный облучатель из стеклотекстолита имеет размеры апертуры 130x130мм, толщину 5 мм и вес 125 гр. На рис. 6 показано фото Т-55 с четырьмя подобными

облучателями, размещёнными на фокусной линии.

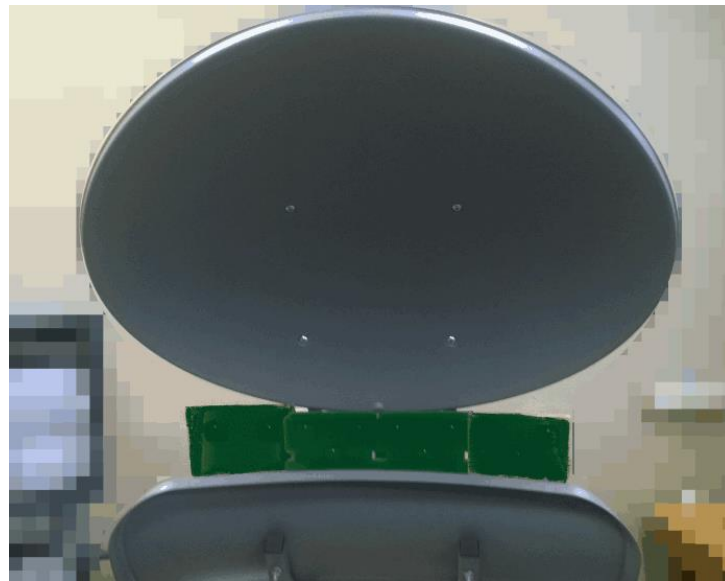


Рис. 6. Т-55 с четырьмя печатными облучателями.

На рис. 7 показаны диаграммы направленности собственно облучателя. По сравнению с С-рупором возможный диапазон частот несколько уже ( $f = 4.0-4.4$  ГГц).

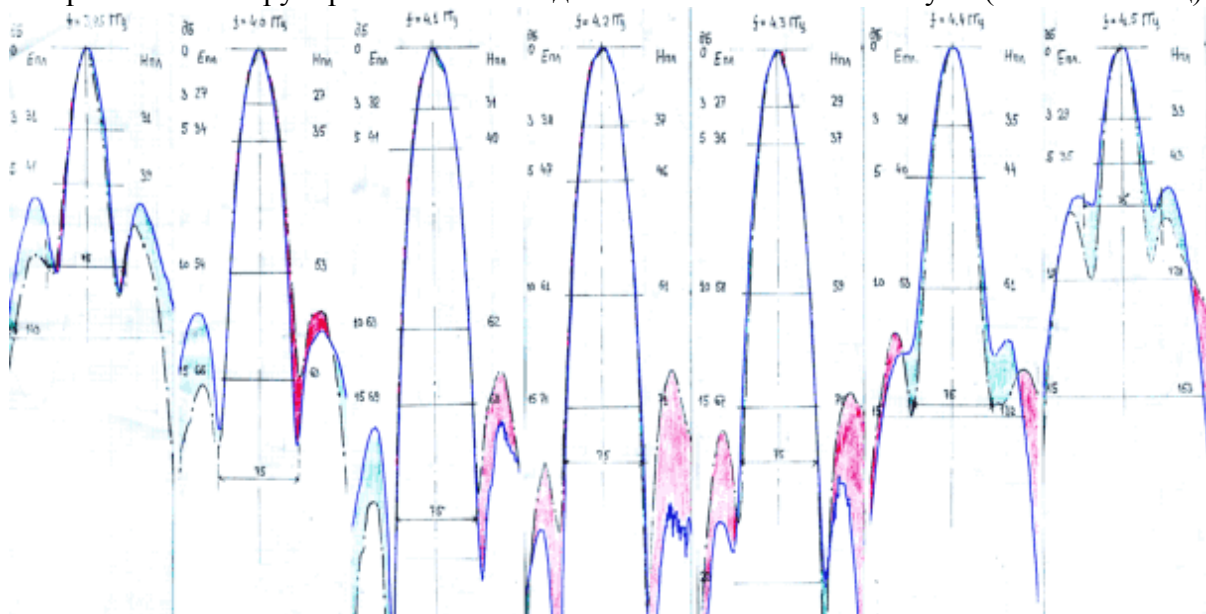


Рис. 7. Диаграммы печатного облучателя.

На рис. 8 показаны диаграммы Т-55 с пятиэлементным облучателем в Епл, а в табл. 2 значения диаграмм по уровням -3, -5, -10, -15, -20 дБ для четырёх положений облучателей, формирующих четыре луча с угловым разносом примерно  $10^\circ$ .

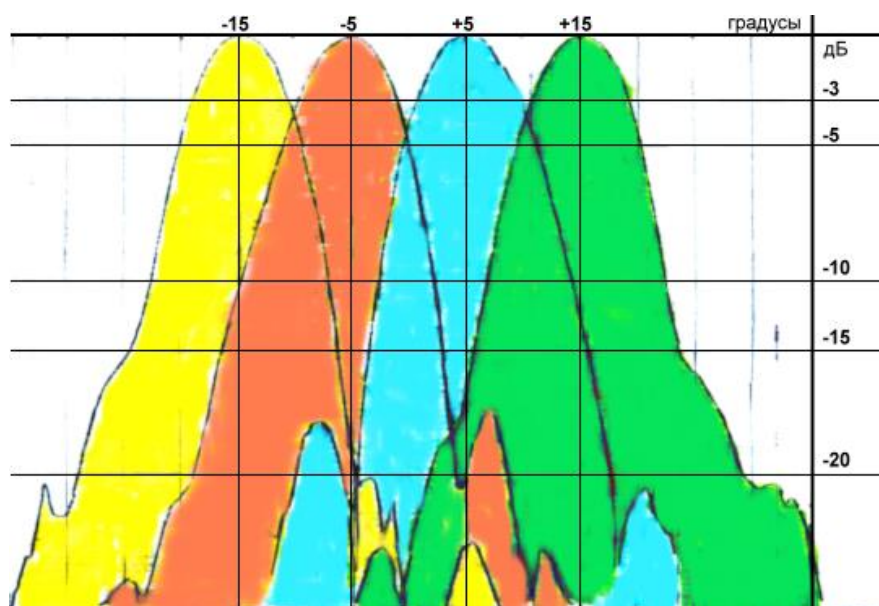


Рис. 8. Диаграммы Т-55 с печатными облучателями.

Таблица 2.

+5°								+15°							
	3,95	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5		3,95	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5
-3	8.7	7.9	7.4	8.0	6.8	7.8	6.8		8.4	7.5	7.2	7.5	6.5	7.7	7.0
	8.7	7.7	7.4	7.7	5.8	7.4	6.2		9.2	8.0	6.3	7.9	6.3	7.5	6.1
-5	11.6	10.2	9.5	10.2	8.8	10.2	8.8		10.7	9.5	9.2	9.5	8.4	10.0	8.8
	11.6	9.9	9.5	10.0	7.6	9.5	7.9		11.9	10.0	8.0	10.1	8.3	9.5	7.7
-10	16.8	15.0	16.0	14.2	14.5	14.2	12.7		15.3	13.7	14.4	12.4	13.5	13.1	12.5
	16.0	14.5	15.1	13.0	12.8	12.8	10.8		16.1	15.0	14.4	13.1	13.3	12.5	10.5
-15	19.1	19.0	19.5	17.8	18.1	19.9	18.5		18.4	20.6	18.2	17.6	18.5	18.8	14.8
	20.2	20.0	18.2	17.3	17.6	19.6	12.7		22.0	20.7	19.0	18.9	21.0	28.5	12.1
-20	22.0	25.0	22.5	19.5	20.1	22.7			25.4	24.5	21.0	20.7	20.3	21.2	20.0
	23.3	29.2	23.8	20.5	20.0	23.9			36.0	24.4	22.4	23.0	27.6	-	17.4
-5°								+15°							
-3	8.3	7.5	7.1	7.7	6.8	8.0	7.7		8.3	7.2	7.1	8.0	6.3	7.5	6.5
	8.5	7.5	7.1	7.7	6.3	7.5	6.0		8.5	7.7	7.2	7.9	6.6	7.5	6.1
-5	11.0	9.5	9.0	9.8	8.7	10.1	10.0		10.7	9.3	9.0	10.0	8.3	9.5	8.4
	10.7	9.7	9.1	9.9	8.0	9.2	7.6		11.0	9.6	9.3	10.0	8.5	9.4	7.8
-10	16.8	14.0	14.8	12.8	14.2	14.1	11.7		15.3	13.4	14.3	12.5	13.0	12.5	11.4
	14.5	13.7	14.3	12.5	12.7	11.6	10.1		14.4	14.1	14.3	12.6	13.0	11.9	10.4
-15	19.3	18.5	18.2	17.4	18.6	20.0	22.2		18.0	17.5	16.3	16.0	17.2	13.5	13.8
	18.7	21.0	16.7	19.0	19.2	19.1	11.7		23.0	20.4	16.1	19.5	19.5	14.6	12.3
-20	22.5	22.4	21.2	21.1	20.6	27.3	30.5		24.0	25.2	21.0	20.6	20.0	28.0	23.2
	33.0	25.6	24.0	23.0	23.0	25.0	12.6		33.3	25.2	24.3	22.7	21.8	35.2	13.3

В работе представлены полученные экспериментальным путём диаграммы направленности многолучевой антенны в Ku диапазоне на базе тороидальной двухзеркальной антенны спутникового телевидения Т-55, которые говорят о пригодности для дальнейшей установки на средний БПЛА с целью исследования подстилающей поверхности СВЧ-радиометрическим способом.

В ходе экспериментального исследования была также проверена возможность работы в более длинноволновом С-диапазоне, где на базе Т-55 можно сформировать четырёхлучевую антенну, которая также подходит для использования с борта БПЛА.

*Работа выполнялась при частичном финансировании в рамках темы НИОКР Росгидромета.*

### **Литература**

1. Development of a Low-Cost Microwave Radiometer for the Early Detection of Fire in Forest Environments. F Alimenti et al. Proc. of the 36<sup>th</sup> European Microwave Conference, September, 2006, Manchester UK, pp 1497-1500
2. F.T. Ulaby et al. Microwave Remote Sensing, Artech House Norwood (MA), USA, 1981
3. Measurement of soil moisture Using Microwave Radiometer O.P.N.Calla et al. Proc of International conference on Microwave-08, pp 621-624
4. <http://www.wavefrontier.us>