

Исследование ионосферы Земли сигналами геосинхронных спутников в Ku-диапазоне

М. В. Дубина¹, И. Л. Афонин²

¹ Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова, г. Севастополь, Россия

lemax89@rambler.ru

² Севастопольский государственный университет
Севастополь, Россия

Аннотация. Рассмотрена методика построения приемного тракта устройства для приема служебных сигналов геосинхронных спутников в Ku-диапазоне для экспериментального исследования неоднородностей верхних слоев атмосферы Земли. Приведены возможности использования полученных результатов измерений для изучения процессов распространения радиоволн.

Ключевые слова. Геосинхронные ИСЗ, радиомаяки, ионосфера, гидрометеоры, тропосферная рефракция.

Ionosphere researching by GSO satellite beacon signals in Ku-band

Maxim V. Dubina¹, Igor L. Afonin²

¹ Black Sea High military college, Sevastopol, Russia

² Sevastopol state university, Sevastopol, Russia

¹ lemax89@rambler.ru

Abstract. This paper describes the design and development of a digital satellite beacon receiver for the different kinds of atmospheric researches. Satellite beacons are frequently available to assist pointing large antennas. Software Defined Radio (SDR) as a terminal device gives possibility to make a cheap tuner for receiving the CW (continuous wave) 3 cm length radio wave which is usually used as the beacon frequency. Some energy equations and formulas help to understand the readers the basic energy performance of the GSO satellite communication. There are practical recommendations how to operate the LNB (low noise block) to achieve the optimal result. The practical circuit has been tested and might be successfully replicated. The article gives some ideas for scientific and technical application of the GSO satellite link for the measurement of microwave propagation.

Keywords. Geostationary satellite (GSO satellite), satellite beacon, ionosphere, troposphere refraction, hydrometeors.

© Dubina M. V., Afonin I. L., 2018

Введение

Интенсивное развитие технологии «непосредственного телевизионного вещания» (НТВ), подразумевавшее использование некоторого количества спутников-ретрансляторов, выведенных на геосинхронную орбиту Земли, находящуюся в плоскости экватора на высоте около 36000 км, не только дало возможность удовлетворить потребности населения большей части нашей планеты в качественном телевидении, но и способствовало удешевлению абонентского оборудования. Большое количество спутников, находящихся в настоящее время на геосинхронной орбите, ретранслируют не только передаваемые с наземных антенн телепрограммы в цифровом формате и данные Интернет, но и различные телеметрические данные о процессах на борту ИСЗ, а также сигналы радиомаяков, которые представляют собой немодулированные колебания на нескольких несущих частотах (от четырех до шести) в Ku- и Ka-диапазонах.

Востребованность спутниковых каналов связи и телевещания привела к выводу на геосинхронную орбиту такого количества ИСЗ, что угловое расстояние между ними в настоящее время фактически не превышает 1,5–2 градусов. Это делает проблематичной уже пространственную селекцию принимаемых сигналов, даже на достаточно большие (диаметром около 1 м) параболические антенны. Поэтому в рабочих частотах транспондеров «соседних» спутников нормативно закреплён существенный разнос по частоте и поляризации сигнала.

Однако такая насыщенность геосинхронной орбиты имеет и положительные стороны, особенно если рассматривать группировку спутников как совокупность генераторов направленной к Земле СВЧ-энергии. Что это может нам дать?

Один из предлагаемых авторами вариантов нестандартного использования телекоммуникационных геосинхронных ИСЗ — это возможность экспериментального проведения исследования неоднородностей тропосферы и состояния ионосферы Земли, и как следствие, получение практических величин рефракции и затухания радиоволн сантиметрового диапазона (рис. 1).

Размещенные на геосинхронной орбите спутники являются источниками высокостабильного по частоте и мощности радиоизлучения, причем точность позиционирования на своей орбите поддерживается в диапазоне $0,1^\circ$ использованием собственных импульсных двигателей. Количество спутников в видимой части небосклона восточного полушария в средних широтах уже более ста. Таким образом, главной задачей в этом случае стоит сбор информации об амплитуде сигнала нормированных по мощности радиомаяков, находящихся на различных спутниках, работающих в режиме непрерывного излучения немодулированного сигнала на фиксированных частотах, и сравнение их относительных величин в разных точках приема. Причем для получения

объемного изображения неоднородностей верхних слоев атмосферы достаточно использовать сигналы с наземных антенн, расположенных на разных широтах, но ориентированных на одни и те же источники излучения. Разумеется, данные об амплитуде сигнала от различных источников для получения трехмерной модели должны обрабатываться централизованно.

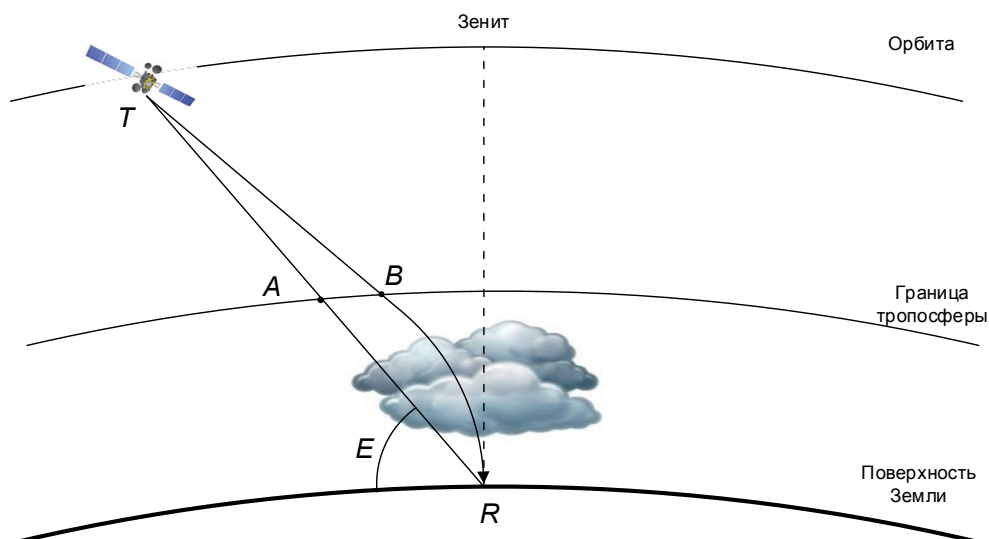


Рис. 1. Идеальное ($T-A-R$) и фактическое ($T-B-R$) распространение радиоволн при рефракции в верхних слоях атмосферы, где E — угол фактического возвышения спутника для точки приема

В работе предлагаются несложные способы приема служебных сигналов геосинхронных спутников и методы их обработки, а также возможности их практического использования.

Исследуемая модель

Сигналы радиомаяков, находящихся на геостационарных спутниках, необходимы для позиционирования наземных передающих антенн точно на спутник. Позиционирование достигается поворотом антенны по максимальному уровню принимаемого сигнала радиомаяка. Суть проблемы в том, что для проведения исследований по приему немодулированных радиоволн сантиметрового диапазона довольно немногих доступных аппаратных средств. Конечно, в рассмотрение не берутся сложные радиоприемные устройства профессионального назначения стоимостью несколько десятков тысяч долларов, а имеющиеся в распоряжении приемники спутникового телевидения, несмотря на дешевизну и гипотетическую возможность приема в этом диапазоне частот, были так конструктивно удешевлены, что приемный тракт целиком интегрирован со смесителем и квадратурным демодулятором фазоманипулированного сигнала, что не позволяет выделять

немодулированные колебания, поступающие с выхода малошумящего конвертера¹ приемника спутникового телевидения.

Задача работы — показать возможность построения недорогого приемного тракта с использованием минимально необходимых аппаратных и программных средств на современной и доступной материальной базе.

Геосинхронные спутники имеют от четырех до шести радиомаяков борту, их эффективно изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) нормирована и составляет около 15 дБВт (рис. 2).

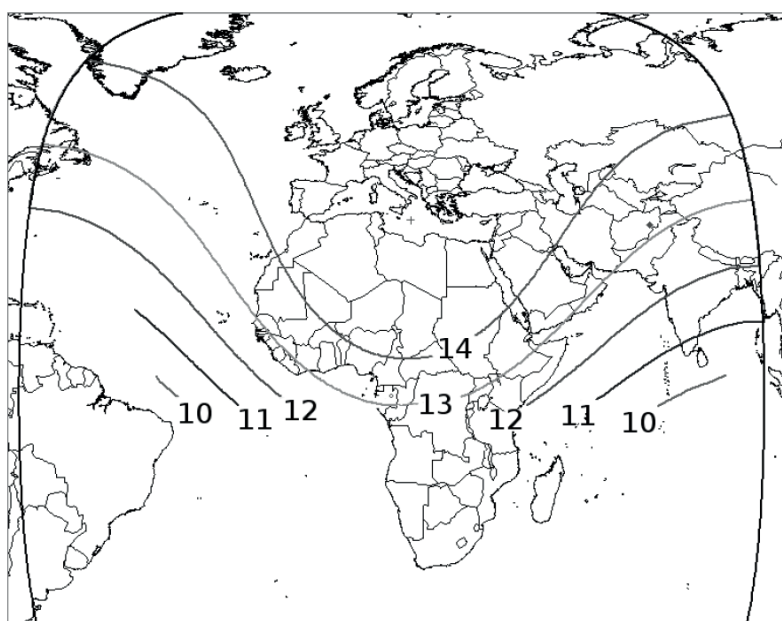


Рис. 2. Значения ЭИИМ радиомаяка спутника Hotbird 13° на частоте 11 ГГц (в дБВт)

Это позволяет создать в точке приема при использовании параболической антенны диаметром 1 м сигнал силой –120 ...–130 дБм (в зависимости от условий приема). [1] Сигналы радиомаяков европейского луча Hotbird 13° нормированы 19 дБВт для Ка-диапазона и 14 дБВт для Ку-диапазона [1].

Усиление параболической антенны [2]:

$$G = \frac{4\pi Ae}{\lambda^2}, \quad (1)$$

где Ae — эффективная площадь антенны, связанная с площадью антенны соотношением:

$$Ae = \eta A, \quad (2)$$

η — это эффективность использования площади антенны, которая, как правило, принимается равной 0,7.

¹ В иностранной литературе — LNB (Low Noise Block downconverter).

Таким образом, на частоте маяка Ku-диапазона усиление параболической антенны диаметром 1 м составит около 35 дБ. Построение приемного тракта предлагается по супергетеродинной схеме с двойным преобразованием со второй ПЧ, равной «нулевой», с использованием SDR- (Software Defined Radio) приемника. SDR-приемники появились относительно недавно, но позволяют производить обработку радиосигнала непосредственно на программном уровне, для чего можно использовать звуковую карту персонального компьютера либо специализированную программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС). Это дает большое преимущество при обработке и анализе полученной информации в результате измерений.

В описываемом варианте будет использован SDR-приемник на базе микроконтроллера RTL2832U от фирмы Realtek и тюнер R820T от фирмы Rafael Micro. Тюнер обеспечивает перестройку принимаемых частот от 24 до 1766 МГц и имеет чувствительность около -90 дБм [4]. Контроллер RTL2832U имеет встроенный 8-битный АЦП и USB2.0-выход, подключаемый к персональному компьютеру. Несмотря на высокий функционал, розничная стоимость такого приемника составляет не более 8 USD.

Таким образом, аналоговая часть приемного тракта сигналов радиомаяков сводится к преобразованию немодулированного сигнала 12 ГГц с мощностью -130 дБм в диапазон, определяемый только характеристиками SDR-приемника и, в конкретном случае, около 30–1700 МГц с мощностью на входе более -90 дБм. Шумовые характеристики приемного устройства и его динамический диапазон более подробно описаны в [3].

Практические результаты

Поступающий со спутника немодулированный сигнал Ku-диапазона, усиленный параболической антенной до уровня -130 дБм (рис. 3), поступает на вход СВЧ-преобразователя, где преобразуется в первую промежуточную частоту около 1100 МГц. На рис. 3 эта частота обозначена как $f_{вч}$, которая зависит от величины частоты опорного генератора, находящегося в корпусе конвертера (СВЧ-преобразователя). Стандартно опорный генератор имеет два значения частоты — 9750 МГц и 10600 МГц. На этом этапе важно подать необходимые напряжения питания на конвертер и, если необходимо, управляющий сигнал, включающий «верхний» или «нижний» опорный генератор СВЧ-преобразователя. Стандартные значения для преобразователей с линейной поляризацией являются: 11–15 В — включение вертикальной поляризации, 15–19 В — включение горизонтальной поляризации, наличие пульсаций в питающем напряжении с амплитудой не менее 0,5 В и частотой 22 кГц $\pm 20\%$ включают «верхний» опорный генератор с частотой 10600 МГц, отсутствие пульсаций включает «нижний» опорный генератор с частотой 9750 МГц.

Для реализации управления и питания СВЧ-преобразователя в качестве первичного источника использовался импульсный источник питания 220 В с выходным напряжением 21 В и током до 0,5 А. К его выходу подключен вторичный источник питания на интегральной микросхеме ШИМ LM2576ADJ, настроенной на выходное напряжение 18 В. Так как для исследования сигнала радиомаяка был выбран спутник Hotbird6 13° с частотами радиомаяков 11699,8 и 11701 МГц (оба сигнала с горизонтальной поляризацией), то, чтобы попасть в рабочую полосу SDR-приемника 30–1700 МГц, необходимо включить горизонтальную поляризацию СВЧ-преобразователя и «верхний» опорный генератор. Например, $11701 - 10600 = 1101$ МГц (удовлетворяет требованиям полосы пропускания). Для этого к напряжению питания конвертера были добавлены пульсации амплитудой 0,5 В и частотой 22 кГц.

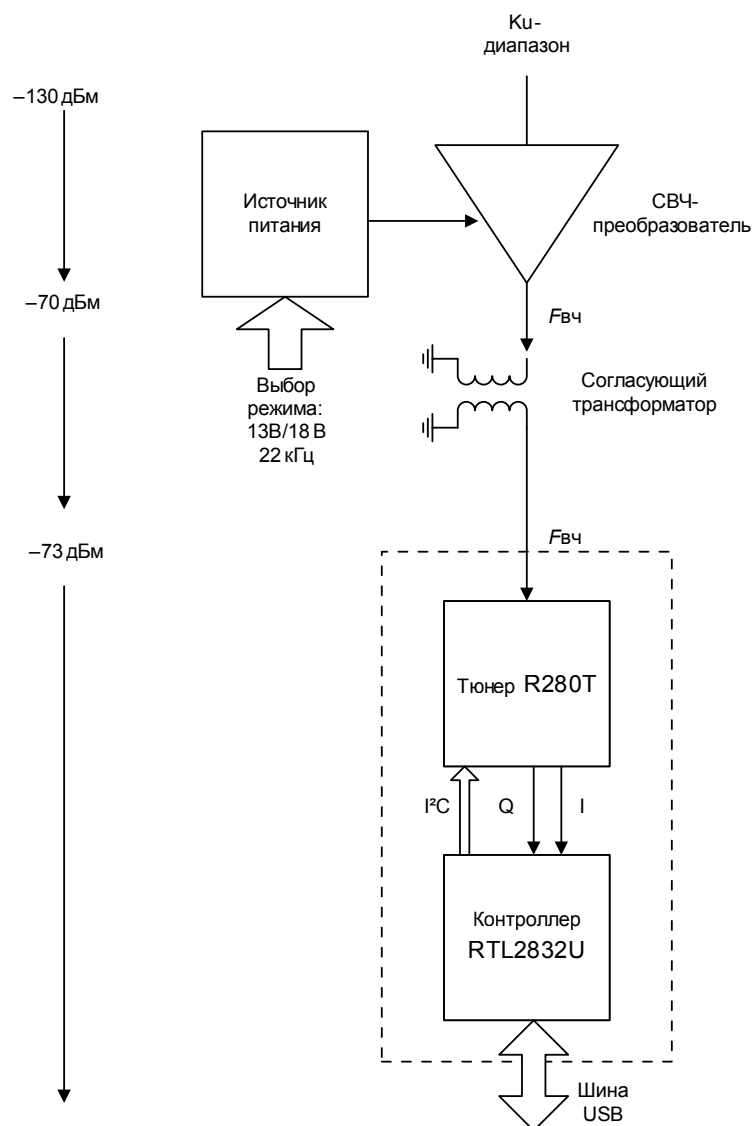


Рис. 3. Предлагаемая схема реализации приемного тракта (пунктирной линией обозначен интегрированный SDR-приемник)

В конкретном случае был применен НЧ-генератор на интегральном таймере NE555 (полный аналог КР1006 ВИ1) с параметрической стабилизацией частоты, нагруженный на кремниевый транзистор малой мощности, выполняющий роль ключа (рис. 4). Точная настройка на рабочую частоту осуществляется подстройкой R3, а величина выходных пульсаций — R4. По приходу управляющего импульса на базу транзистора VT1 последний открывается и шунтирует открытым переходом коллектор-эмиттер кремниевый диод VD2, на котором в закрытом состоянии транзистора падение напряжения составляет около 0,5 В. Открытый транзистор шунтирует диод, и напряжение на выходе схемы возрастает на 0,5 В.

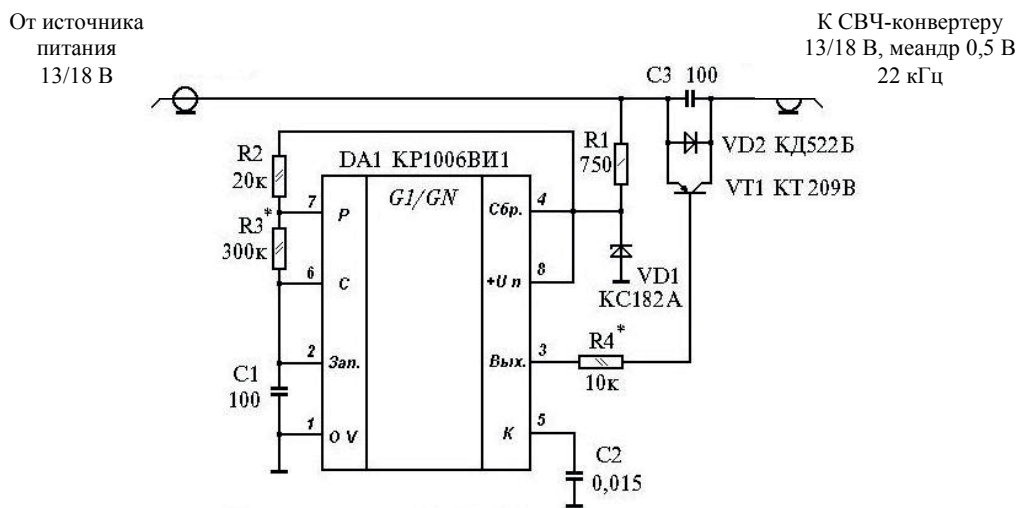


Рис. 4. Схема формирователя тонального сигнала 22 кГц

Согласующий трансформатор (рис. 3) использовался для гальванической развязки входа приемника и согласования с нагрузкой. Так как использовался один и тот же кабель для питания конвертера и передачи сигнала в приемник, была произведена развязка по ВЧ, выполненная последовательным включением дросселя (около 4 мкГн) в цепь питания (на схеме не показан).

На рис. 5 приведен снимок с экрана планшета ASUS TF300TG, работающего под управлением ОС Android, в момент приема сигналов радиомаяков.

Принятые сигналы соответствуют двум разным спутникам (Hotbird7A и Hotbird9 — оба принадлежат компании Eutelsat), находящимся в одной угловой позиции. Сигналы несущей радиомаяка имеют максимальную интенсивность (около -25 дБм), рядом симметрично расположены сигналы спутниковой телеметрии (около -33 дБм). На рис. 6 приведен сигнал тех же спутников, только в программе HSDR на настольном компьютере под управлением ОС Windows 7.

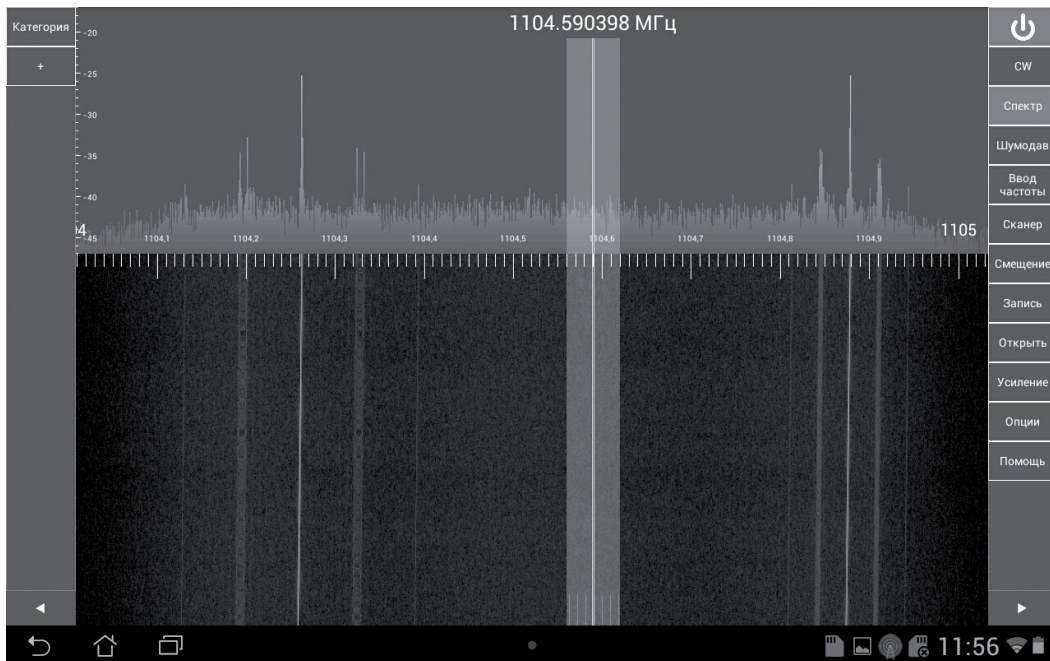


Рис. 5. Панорамный интерфейс программы SDR Touch, использованной для управления SDR-приемником

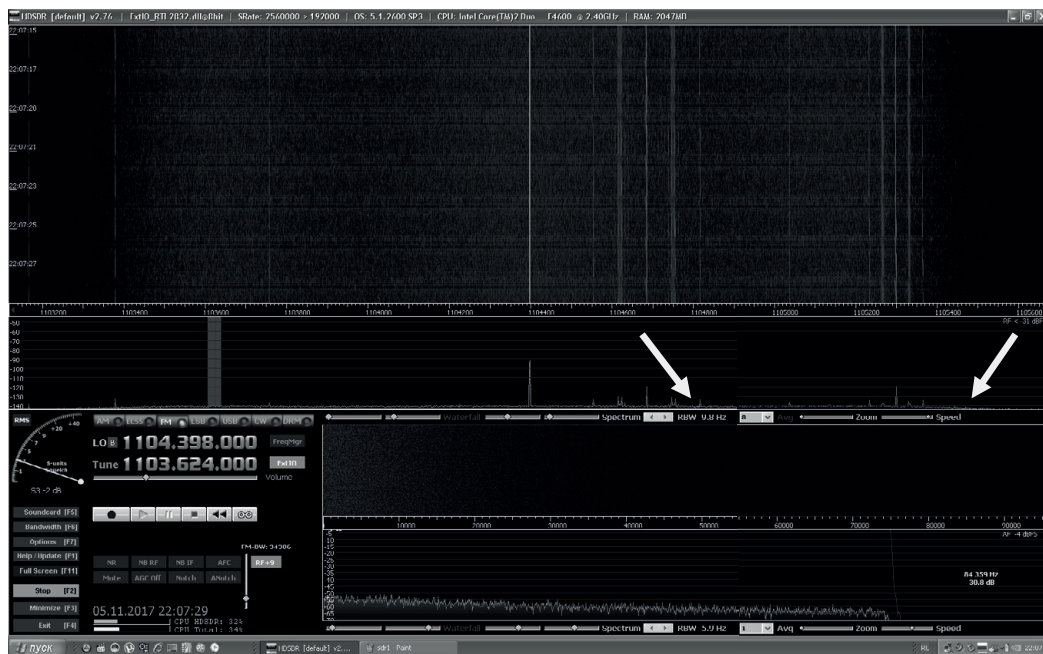


Рис. 6. Сигналы спутников Hotbird7A и Hotbird9 (белые стрелки) в интерфейсе программы HDSDR

Заключение

Описанный в статье приемник спутниковых радиомаяков не претендует на фундаментальность построения структурной схемы, лишь показывает возможность получения достаточно несложного и точно-

го инструмента для изучения ионосферы и неоднородностей в других слоях атмосферы Земли. Запись результатов измерений и последующий их анализ могут показать новые зависимости (годовые, суточные), необходимые для всеобъемлющего изучения характера распространения радиоволн в околоземном пространстве. Актуальным вопросом остается исследование распространения радиоволн в околоземном пространстве в высоких широтах и при низких углах возвышения спутников. Так, в системе GPS не принимаются для расчета координат объекта данные со спутников, находящихся при углах возвышения менее 10° над горизонтом именно из-за погрешности, вносимой рефракционными искажениями, причем влияние этого фактора приводит к суммарным ошибкам при работе систем навигации до 5–6 м, что составляет большую половину погрешности измерений. Еще хуже дело обстоит с радиолокационными системами, где прямая и отраженные волны распространяются не выходя за пределы ионосферы, в этом случае суммарная ошибка РЛС дециметрового диапазона может составлять до нескольких сотен метров [4].

Благодарность

Авторы выражают признательность старшему преподавателю кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и информационной безопасности ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» Владимиру Михайловичу Иськиву за оказанную помощь в проведении измерений при постройке практической модели и ряд полезных советов.

Список литературы

1. Machado F., Vilar E. Easy-to-build satellite beacon receiver for propagation experimentation at millimeter bands // *Radioengineering*. 2014. Vol. 23, No. 1. P. 155–157.
2. Mikkelsen E. The Design of low cost beacon receiver system using SDR. Norwegian University of Science and Technology, 2009. P. 6.
3. Rafael Micro. R820T. High Performance Low Power Advanced Digital TV Silicon Tuner. Datasheet. P.12 [Electronic resource]. URL: https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2013/04/R820T_datasheet-Non_R-20111130_unlocked1.pdf (date of access: 11.04.18).
4. Burton D. K. Radar equation for modern radar. 2011. P. 257.

References

1. Machado F., Vilar E. Easy-to-build satellite beacon receiver for propagation experimentation at millimeter bands. *Radioengineering*, 2014, vol.23, no.1, pp. 155–157.

2. Mikkelsen E. *The Design of low cost beacon receiver system using SDR*, Norwegian University of Science and Technology, 2009, p.6.

3. Rafael Micro. R820T. High Performance Low Power Advanced Digital TV Silicon Tuner. Datasheet. P.12. Available at: https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2013/04/R820T_datasheet-Non_R-20111130_unlocked1.pdf (accessed: 11.04.18).

4. Burton D. *Radar equation for modern radar*. 2011, p.257.

Информация об авторах

Афонин Игорь Леонидович — заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Севастопольского государственного университета, доктор технических наук, профессор. СВЧ-измерения, распространение, волноводные тракты.

Дубина Максим Витальевич — преподаватель кафедры боевого применения радиотехнических средств и радиоэлектроники Черноморского высшего военно-морского училища имени П. С. Нахимова. Радиоприемные и радиопередающие устройства КВ-УКВ, микроконтроллеры в связи, многопозиционная радиолокация.

Information about the authors

Afonin L. Igor, head of a chair (radio electronics and telecommunication) of Sevastopol state university, Doctor of Technical science, professor. UHF, propagation, waveguides.

Dubina V. Maxim, lecturer of the radio electronics warfare department of the Black Sea High military college. HF-VHF receivers and transmitters, AVR in communication, multistatic radar system.