

**И. М. Мыценко, Д. Д. Халамейда***Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: khalameyda@ire.kharkov.ua***БИСТАТИЧЕСКАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОСИГНАЛОВ  
ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ**

Рассмотрена бистатическая радиолокационная система с применением радиосигналов геостационарных искусственных спутников Земли (ИСЗ), которая позволяет обнаруживать гидрометеообразования и турбулентные движения в тропосфере. Приведено описание приемного измерительного комплекса и результаты экспериментальных исследований при различных метеорологических условиях и скоростях ветра. Для определения параметров гидрометеообразований и диагноза опасных для человека атмосферных явлений над большими территориями предложено применение многопозиционной бистатической системы с использованием радиосигналов геостационарных ИСЗ и приемными пунктами, установленными в разных точках обслуживаемых территорий. Ил. 4. Библиогр.: 13 назв.

**Ключевые слова:** бистатическая РЛС, спутниковый конвертор.

В настоящее время все большее внимание привлекают бистатические радиолокационные системы (БРЛС) с обнаружением на просвет. Как известно [1–3], к достоинствам таких систем следует отнести возможность обнаружения мало-размерных целей, что обусловлено резким (на 20...40 дБ) [4] увеличением эффективной поверхности рассеяния при пересечении (или вблизи) линии базы. К недостаткам таких систем следует отнести трудность определения местоположения целей, но в работах [4–6] показано, что и эта задача может быть решена. Например, в работе [7] рассмотрен радиолокатор для измерения дальности  $r(t)$  движущихся целей с двумя несущими частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . В этом случае, при наличии одной цели, на вход детектора поступают четыре сигнала: два сигнала от передатчиков  $\omega_1$  и  $\omega_2$  и два сигнала, отраженных от цели. При движении цели, за счет эффекта Доплера, после детектирования принятого сигнала возникают комбинационные спектральные составляющие, которые выделяются фильтром доплеровских частот и подаются на измеритель фазы  $\Phi(t)$ . Расстояние до цели пропорционально мгновенной разности фаз  $\Phi(t)$  и может быть получено с помощью выражения:

$$r(t) = \frac{c}{2(\omega_1 - \omega_2)} \Phi(t), \quad (1)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

В просветных БРЛС обнаружение отраженного от цели сигнала происходит на фоне прямого сигнала передатчика [8]. В результате на входе приемника возникает интерференционный сигнал, модулированный по амплитуде доплеровской частотой. Сигнал доплеровской частоты можно выделить путем амплитудного детектирования. При этом не требуется знать несущую час-

тоту зондирующего сигнала, что при разнесении приемника и передатчика является существенным преимуществом.

Одним из первостепенных требований к разрабатываемой и используемой аппаратуре является ее экологическая безопасность. Бистатические системы дают возможность расположить передатчик в местах, где негативное влияние на человека и окружающую среду сводится к минимуму, а прием вести там, где это необходимо для решаемых задач [9]. Также представляет интерес применение радиосигналов существующих радиостанций различного назначения. Например, в работе [10] рассматривается возможность создания БРЛС, где в качестве зондирующего сигнала используются сигналы связанных станций коротковолнового диапазона.

Широкое применение спутникового телевидения, простота и доступность аппаратуры, выделенные частотные диапазоны и экологическая безопасность поставили задачу исследования возможности использования сигналов геостационарных искусственных спутников Земли (ИСЗ) для определения параметров гидрометеообразований [11]. Целью данной работы является исследование возможности обнаружения гидрометеообразований бистатической просветной РЛС, использующей радиосигналы геостационарного ИСЗ.

Как известно [4], в зависимости от расположения источника опорного сигнала, когерентные РЛС подразделяются на РЛС с внутренней и с внешней когерентностью. В РЛС с внутренней когерентностью источником опорного сигнала служит когерентный гетеродин, который может фазироваться сигналом генератора радиочастоты в псевдокогерентной РЛС или служить задающим генератором многокаскадного пере-

датчика в истинно когерентной РЛС. В РЛС с внешней когерентностью в качестве опорного сигнала применяют сигналы, отраженные от неподвижных объектов, находящихся в одном элементе разрешения с целью. Когерентные сигналы могут быть модулированы и не должны иметь случайных изменений или хаотичных скачков фазы высокочастотного заполнения [4]. Этим требованиям и соответствуют радиосигналы геостационарного ИСЗ.

**1. Описание функциональной схемы.**

БРЛС, использующая сигналы геостационарного ИСЗ, работает следующим образом (рис. 1).

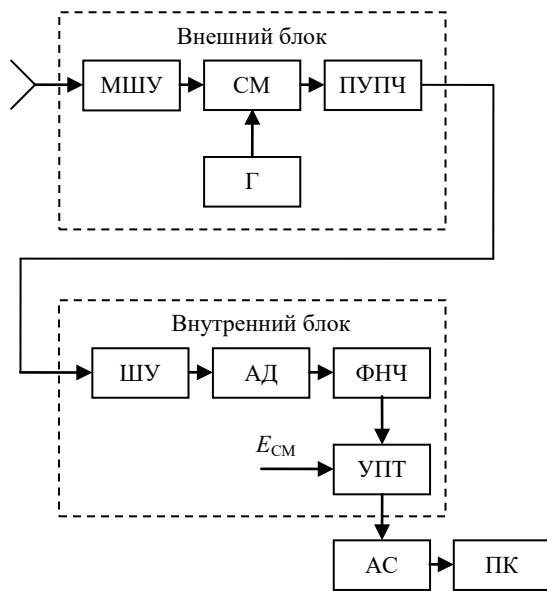


Рис. 1. Функциональная схема приемного комплекса: МШУ – маломощный усилитель ( $f_{\text{вых}} = 10,7 \dots 12,75$  ГГц,  $K_{\text{ш}} = 0,6$  дБ); СМ – смеситель; Г – гетеродин; ПУПЧ – предварительный усилитель промежуточной частоты; ШУ – широкополосный усилитель; АД – амплитудный детектор; ФНЧ – фильтр низких частот; УПТ – усилитель постоянного тока ( $K_y = 20$  дБ); АС – анализатор спектра; ПК – персональный компьютер

Прием радиосигнала геостационарного ИСЗ осуществляется стандартными антенной диаметром 0,9 м и конвертором сантиметрового диапазона (частотный диапазон  $f = 10,7 \dots 12,75$  ГГц, коэффициент шума  $K_{\text{ш}} = 0,6$  дБ), представляющей собой внешний блок. Внешний блок состоит из маломощного усилителя МШУ, смесителя СМ, гетеродина Г ( $f_{\text{Г}} = 9,75$  ГГц/10,6 ГГц) и предварительного усилителя промежуточной частоты ПУПЧ ( $f_{\text{ПЧ}} = 950 \dots 2$  150 МГц). Общее усиление конвертора составляет  $\sim 65$  дБ. Выходной сигнал внешнего блока с помощью кабеля подается на вход внутреннего блока. Внутренний блок состоит из широкополосного усилителя ШУ с коэффициентом усиления  $K_{\text{ШУ}} = 18$  дБ в полосе частот  $950 \dots 2$  150 МГц, которая совпадает с по-

лосой частот ПУПЧ, детектора огибающей АД, фильтра нижних частот ФНЧ и усилителя постоянного тока УПТ. Широкополосный усилитель ШУ осуществляет дополнительное усиление сигнала промежуточной частоты ПЧ. Усиленный сигнал ПЧ поступает на вход АД, где детектируется и с помощью фильтра ФНЧ ( $f_{\text{ФЧ}} = 0 \dots 1$  кГц) выделяется его флуктуационная составляющая. Усиление флуктуационной составляющей осуществляется с помощью УПТ ( $K_y = 20$  дБ), собранном на основе операционного усилителя.

На неинвертирующий вход УПТ после фильтрации поступает сигнал с выхода детектора огибающей. Постоянная составляющая этого сигнала значительно превышает амплитуду флуктуационной составляющей (на  $20 \dots 40$  дБ). Поэтому на инвертирующий вход операционного усилителя подается от стабилизированного источника напряжение  $E_{\text{СМ}}$ , которое компенсирует постоянную составляющую сигнала и дает возможность усилить флуктуационную составляющую сигнала без ограничения до необходимого рабочего уровня анализатора спектра АС, работающего в полосе частот  $0 \dots 600$  Гц. Принцип преобразования – быстрое преобразование Фурье. Персональный компьютер ПК используется для отображения и хранения информации.

Геометрические параметры трассы распространения радиоволны показаны на рис. 2.

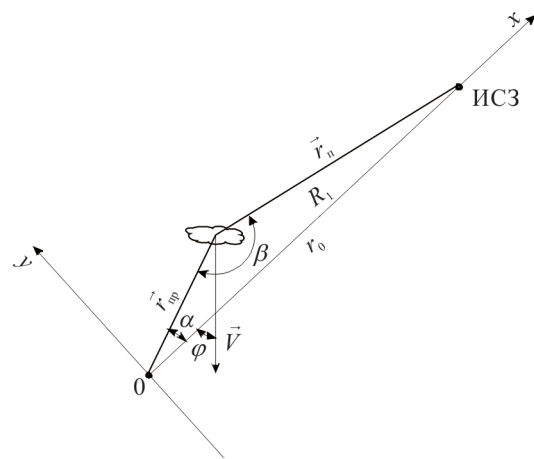


Рис. 2. Геометрические параметры трассы распространения:  $r_0$  – длина линии базы;  $r_n$  – дальность от ИСЗ до цели;  $r_{\text{нр}}$  – дальность от цели до приемной антенны;  $\alpha$  – угол между направлением на ИСЗ и целью (азимут);  $\beta$  – угол между направлениями от цели на передающую и приемную антенны;  $V$  – вектор скорости движения цели;  $\phi$  – угол наклона траектории линии базы

Система координат  $XOY$  лежит в горизонтальной плоскости. Зона обнаружения такой системы находится вдоль линии базы и определяется как зона, в которой наблюдается значительное

увеличение бистатической эффективной площади рассеяния (БЭПР) цели. Она ограничивается минимальным значением бистатического угла  $\beta_{\min} = 150^\circ$  [12].

Как известно [6–8], принимаемый интерференционный сигнал модулирован по амплитуде с доплеровской частотой  $F$ , которая определяется выражением [12]

$$F(t) = \frac{1}{\lambda} \frac{dr(t)}{dt} = -\frac{1}{\lambda} \frac{dr_{\text{ц}}(t) + r_{\text{пр}}(t)}{dt} = -\frac{1}{\lambda} [V_{\text{ц}}(t) + V_{\text{пр}}(t)], \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $t$  – время;  $r(t)$  – суммарная дальность,

$$r(t) = r_{\text{ц}}(t) + r_{\text{пр}}(t). \quad (3)$$

Для радиолокационной системы БРЛС (рис. 2) расстояния  $r_{\text{ц}}(t)$  и  $r_{\text{пр}}(t)$  представляют собой модули векторов  $\vec{r}_{\text{ц}}(t)$  и  $\vec{r}_{\text{пр}}(t)$ ,  $V_{\text{ц}}$  и  $V_{\text{пр}}$  – проекции вектора скорости цели  $\vec{V}$  на векторы  $\vec{r}_{\text{ц}}(t)$  и  $\vec{r}_{\text{пр}}(t)$  соответственно.

Из (2) следует, что при приближении цели к линии базы величина доплеровской частоты уменьшается и является положительной. В момент пересечения линии базы значение доплеровской частоты равно нулю, так как значения  $V_{\text{ц}}$  и  $V_{\text{пр}}$  равны по величине и противоположны по знаку; при дальнейшем движении цели величина доплеровской частоты меняет знак на противоположный.

**2. Результаты эксперимента.** На рис. 3, а–в представлены текущие спектры амплитудных флуктуаций. Спектр на рис. 3, а соответствует слоисто-кучевым облакам, ветру 20 м/с, интенсивному дождю. Турбулентное движение в тропосфере наблюдалось на частоте  $\approx 36$  Гц. Спектр на рис. 3, б наблюдался при кучевых облаках и ветре 8 м/с. Турбулентное движение наблюдалось на частоте, близкой к 20 Гц. Спектр на рис. 3, в соответствует слоисто-кучевым облакам и ветру  $\sim 3$  м/с. Турбулентное движение в тропосфере не наблюдалось.

На рис. 3, г приведен спектр уровня сигнала, полученного в преддождевой ситуации, при наличии облачности, кучевых облаков, скорости ветра 7 м/с. Наблюдалось турбулентное движение в тропосфере на двух частотах: 35,0 и 65,0 Гц. Следует отметить, что эти частоты не были постоянными и медленно изменялись в сторону уменьшения, а затем исчезли. Объяснить физические причины их появления не удалось.

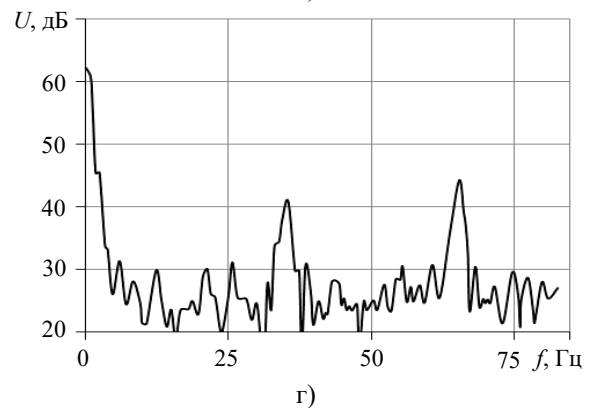
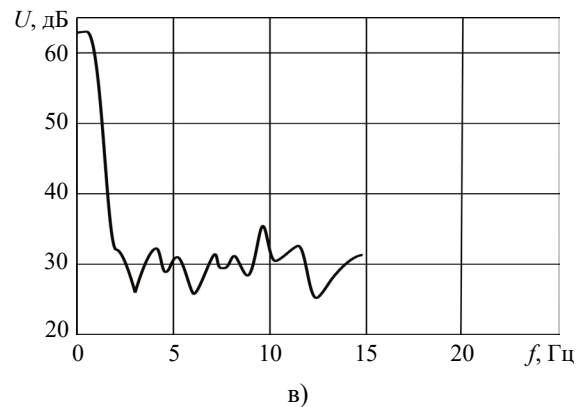
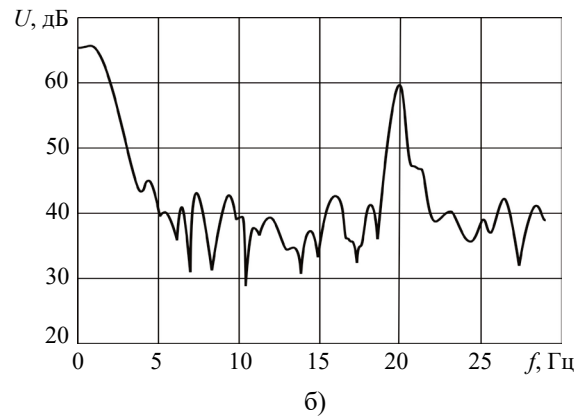
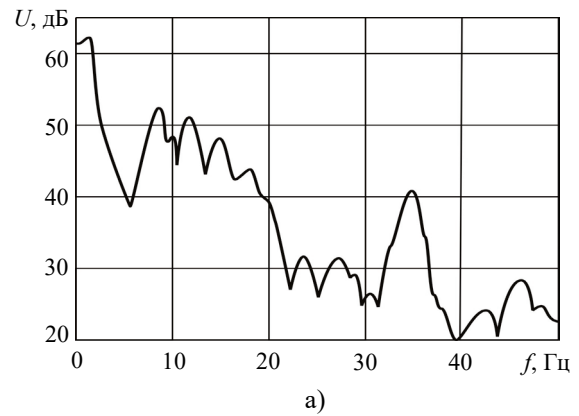


Рис. 3. Спектры амплитудных флуктуаций

**Выводы.** Проведенные экспериментальные исследования показали, что для определения

параметров гидрометеообразований и диагноза опасных для человека явлений над большими территориями возможно применение многопозиционной бистатической системы с использованием радиосигналов геостационарных ИСЗ [13] и приемными пунктами, установленными в различных точках охраняемых территорий. Сигналы от приемных пунктов передаются в центр обработки, который определяет координаты метеообразования и следит за его перемещением (рис. 4).

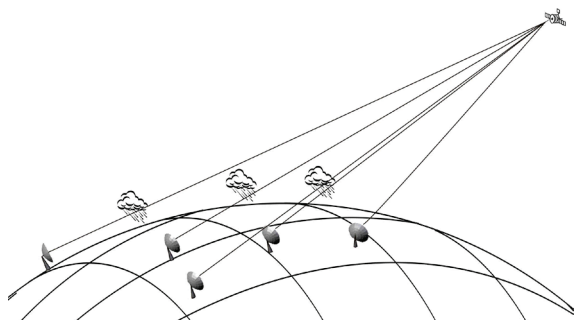


Рис. 4. Многопозиционная бистатическая радиолокационная система

Кроме этого, на каждом из приемных пунктов определяется ослабление сигналов относительно наиболее благоприятных условий распространения радиоволн. Это дает возможность характеризовать не только турбулентные процессы в атмосфере по спектрам принимаемых сигналов, но и распределение влаги по районам.

Исходя из анализа полученных экспериментальных результатов, можно сделать вывод, что обнаружение гидрометеообразований многопозиционной бистатической РЛС, использующей радиосигналы геостационарного ИСЗ, возможно и может быть осуществлено с помощью достаточно простой и доступной аппаратуры.

#### Библиографический список

1. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Я. Д. Ширмана. Москва: Советское радио, 1970. 560 с.
2. Blyakhman A. B. Forward Scattering Bistatic Radar. *Proceedings of PIERS Workshop on Advances in Radar Methods*. Baveno, Italy, July 20–22 1998. P. 107–113.
3. Ковалев А. Н., Ковалев Ф. Н. Формулы расчета параметров траектории цели в просветных бистатических радиолокаторах. *Вестник Саратовского гос. техн. ун-та* (Вестник СГТУ). Саратов, 2013. № 4(73). С. 35–37.
4. Бакулев П. А., Степин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей. Москва: Радио и связь, 1986. 288 с.
5. Бляхман А. Б., Ковалев Ф. Н., Рындык А. Г. Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружения объектов при радиолокации «на просвет». *Радиотехника*. 2001. № 1. С. 4.
6. Устройство для определения параметров движения цели: Патент РФ: МПК GO IS 13/06 / А. Б. Бляхман,

- А. Г. Рындык, Ф. Н. Ковалев. № 2124220; заявл. 29.10.1997; опубл. 27.12.1998. Бюл. № 36.
7. Бакулев П. А. Радиолокация движущихся целей. Москва: Советское радио, 1964. 335 с.
8. Бляхман А. Б., Мякинков А. В., Рындык А. Г. Пространственно-временная обработка сигналов в бистатической просветной радиолокационной системе с антенной решеткой. *Радиотехника и электроника*. 2004. Т. 49, № 6. С. 707–712.
9. Mytsenko I. M., Khomenko S. I. An Ecologically Clean Over-the-Horizon Radar for Protection of Territorial Sea Waters. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2005. Vol. 63, N 8. P. 689–698.
10. Луценко И. В., Попов И. В., Луценко В. И. Бистатические РЛС с подсветкой ионосферными сигналами связных станций коротковолнового диапазона. *Радиофизика и электроника*. Сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. Харьков, 2007. Т. 12, № 1. С. 199–204.
11. Мыценко И. М., Халамейда Д. Д., Хоменко С. И. Использование радиосигналов ИСЗ для определения параметров гидрометеообразований. *Радиофизика и электроника*. Сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. Харьков, 2007. Т. 12, № 1. С. 195–198.
12. Ковалев Ф. Н. Определение координат движущихся целей по измерениям доплеровской частоты в радиолокационных системах с обнаружением «на просвет». *Радиотехника и электроника*. 2007. Т. 52, № 3. С. 331–339.
13. Mytsenko I. M., Khalameyda D. D. Multiposition Bistatic Radar System Using Radio Signals of Geostationary Satellites for Hydrometeors Parameters Determination. *European Radar Conference* (EuRAD 2010): Proceedings Conference (Paris, Sept. 30 – Oct. 1, 2010).

#### REFERENCES

1. SHIRMAN, Ja. D., ed., 1970. *Theoretical bases of radar*. Moscow: Sovetskoe radio Publ. (in Russian).
2. BLYAKHMAN, A. B., 1998. Forward Scattering Bistatic Radar. In: *Proceedings of PIERS Workshop on Advances in Radar Methods*. Baveno, Italy, July 20–22 1998. P. 107–113.
3. KOVALEV, A. M., KOVALEV, F. N., 2013. Formulas for calculating the parameters of the target trajectory in luminous bistatic radars. *Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta* (Vestnik SGTU). Saratov. Vol. 4(73), pp. 35–37 (in Russian).
4. BAKULEV, P. A., STEPIN, V. M., 1986. *Methods and devices for selection of moving targets*. Moscow: Radio i svyaz Publ. (in Russian).
5. BLYAHMAN, A. B., KOVALEV, F. N., RYNDIK, A. G., 2001. Bistatic scattering cross-section and detection of objects during radar “on clearance”. *Radiotekhnika*. No. 1, p. 4 (in Russian).
6. BLYAHMAN, A. B., RYNDIK, A. G., KOVALEV, F. N. *Device for determining the parameters of the movement of the target*. Russian Federation. Pat. No. 2124220 (in Russian).
7. BAKULEV, P. A., 1964. Radiolocation of moving targets. Moscow: Sovetskoe radio Publ. (in Russian).
8. BLYAHMAN, A. B., MAKINKOV, A. V., RYNDIK, A. G., 2004. Space-time processing of signals in a bistatic clearing radar system with an antenna array. *Radiotekhnika i elektronika*. Vol. 49, no. 6, pp. 707–712 (in Russian).
9. MYTSENKO, I. M., KHOMENKO, S. I., 2005. An Ecologically Clean Over-the-Horizon Radar for Protection of Territorial Sea Waters. *Telecommunications and Radio Engineering*. Vol. 63, no. 8, pp. 689–698.
10. LUTSENKO, I. V., POPOV, I. V., LUTSENKO, V. I., 2007. Bistatic radar with illumination of ionospheric signals of communication stations of short-wave range. *Radiofizika i elektronika*. Vol. 12, no. 1, pp. 199–204 (in Russian).

11. MYTSENKO, I. M., KHALAMEYDA, D. D., KHOMENKO, S. I., 2008. Use of Geostationary Satellite Radio Signals for Determining of Hydrometeor Parameters. *Telecommunications and Radio Engineering*. Vol. 67, Iss. 1, pp. 87–95.
12. KOVALEV, F. N., 2007. Determination of the coordinates of moving targets from measurements of the Doppler frequency in radar systems with detection of “on clearance”. *Radio-tehnika i elektronika*. Vol. 52, no. 3, pp. 331–339 (in Russian).
13. MYTSENKO, I. M., KHALAMEYDA, D. D., 2010. Multiposition Bistatic Radar System Using Radio Signals of Geostationary Satellites for Hydrometeors Parameters Determination. In: *Proceedings of the Seventh European Radar Conference (EuRAD 2010)*, Paris, France, 30 Sept. – 1 Oct. 2010.

*Рукопись поступила 27.02.2017.*

I. M. Mytsenko, D. D. Khalameyda

#### BISTATIC RADAR SYSTEM USING RADIO SIGNALS OF GEOSTATIONARY SATELLITE LOW NOISE BLOCKS

The bistatic radar system using radio signals of geostationary satellites is considered. The system allows detecting hydrometeors and turbulent movements in the troposphere. The description of the receiving measuring complex and the results of experimental observations during various meteorological condi-

tions and wind speeds are shown. Applying a multi-position bistatic system using radio signals of geostationary satellites and reception points installed at different points of the serviced territories was proposed to determine hydrometeors parameters and to predict atmospheric hazardous phenomena over large areas.

**Key words:** bistatic radar, satellite low noise block.

I. М. Миценко, Д. Д. Халамейда

#### БІСТАТИЧНІ РАДІОЛОКАЦІЙНІ СИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ РАДІОСИГНАЛІВ ГЕОСТАЦІОНАРНИХ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ

Розглянуто бістатичну радіолокаційну систему із застосуванням радіосигналів геостационарних ШСЗ, яка дозволяє виявляти гідрометеоутворення і турбулентний рух у тропосфері. Наведено опис приймального вимірювального комплексу і результати експериментальних досліджень при різних метеорологічних умовах і швидкостях вітру. Для визначення параметрів гідрометеоутворень і діагнозу небезпечних для людини атмосферних явищ над великими територіями запропоновано застосовувати багатопозиційну бістатичну систему з використанням радіосигналів геостационарних ШСЗ і приймальними пунктами, встановленими в різних точках обслуговуваних територій.

**Ключові слова:** бістатична РЛС, супутниковий конвертор.