

УДК 621.396.962.4+551.507.362.2

## Сканирующий СВЧ-радиометр РМ-08 ИСЗ «Січ-1»

В. А. Комяк<sup>1</sup>, А. С. Левда<sup>2</sup>, В. В. Рыбин<sup>3</sup>,  
С. А. Шило<sup>1</sup>, С. Е. Яцевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт радиофизики і електроніки НАН України, Харків

<sup>2</sup>Центр радіофізичного зондування Землі НАН України і НКА України, Харків

<sup>3</sup>Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

*Надійшла до редакції 11.03.98*

Обговорюється призначення радіометричної системи РМ-08 ІСЗ «Січ-1», особливості її структури, принципи та технічні рішення, які покладені в основу схем сканування та калібровки.

Сканирующий СВЧ-радиометр (СКРМ) 8-мм диапазона волн предназначен для исследования земной поверхности, ледяных покровов и океана в составе комплекса радиофизической аппаратуры (РФА) ИСЗ «Січ-1». Комплекс РФА включает в себя также радиолокатор бокового обзора (РЛС БО) 3-см диапазона волн [4]. Выходные данные радиометра и радиолокатора на борту ИСЗ объединяются с синхронно получаемой информацией радиотелевизионного комплекса РТВК, оснащенного многозональным оптическим сканером МСУ-М [6], в единый информационный поток, содержащий три синхронно формируемые изображения (радиотепловое, радиолокационное и оптическое) одних и тех же участков земной поверхности, и транслируются по стандартным линиям передачи в частотных диапазонах 137 Мгц и 465 Мгц на приемные пункты.

Синхронные данные радиолокационных и радиометрических наблюдений в сочетании с видеoinформацией сканера не только дополняют друг друга, но и позволяют в ряде случаев избежать неоднозначности интерпретации результатов зондирования [8].

Принадлежность РМ-08 комплексу РФА определила выбор как принципов обзора пространства, так и схемы построения прибора.

Выбор рабочей длины волны  $\lambda \approx 8$  мм и горизонтальной поляризации принимаемого излучения определяется оптимизацией комплекса к решению задач наблюдения океана и льдов [8]. Необходимость одновременного с РЛС БО наблюдения одних и тех же участков поверхности Земли в совмещенной полосе обзора определила выбор сектора углов сканирования РМ-08 (начальный угол  $\geq 20^\circ$  от надира, сектор углов  $\approx 30^\circ$ ). Исходя из требований единой строчно-кадровой структуры построения информационного потока, было выбрано линейное сканирование диаграммой направленности антенны в плоскости, ортогональной вектору линейной скорости ИСЗ. Такой вариант сканирования, несмотря на недостатки, связанные с изменением угла наблюдения от положения луча антенны, обеспечивает оптимальную, с точки зрения времени на получение информации, чувствительность системы (максимально возможное время интегрирования).

Функционально СКРМ состоит из сканирующей антенны, радиометрического приемника, устройств

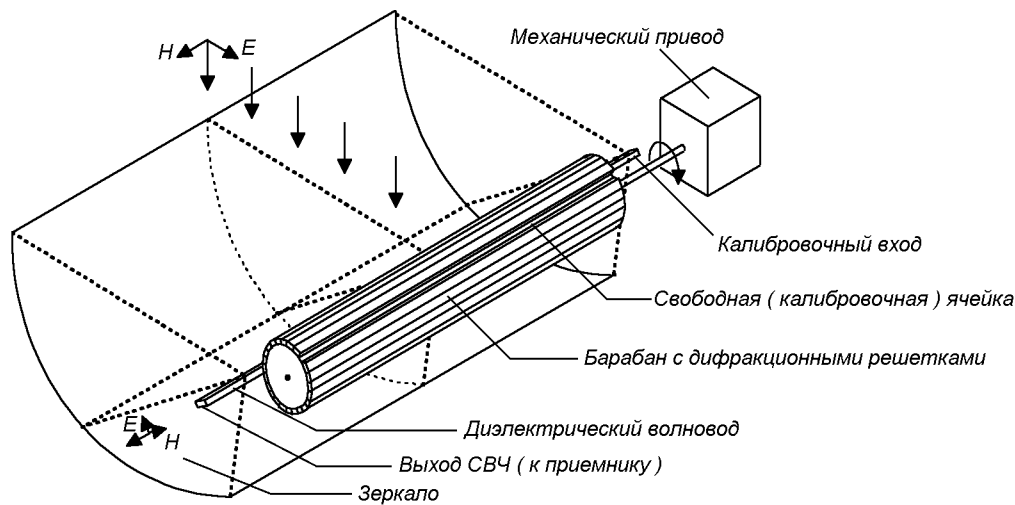


Рис. 1. Схема антенны РМ-08

питания, управления и телеметрического контроля. С выхода радиометрической системы сигнал поступает в блок обработки (БОС), где преобразуется в цифровую форму. В БОС формируется строка радиометрического изображения, производится коррекция геометрических искажений, вызванных сферичностью Земли, после чего осуществляется вывод радиометрической информации в составе строки совмещенного (радиометрического, радиолокационного и оптического) изображения; при этом за счет внутреннего тиражирования строк согласуются частоты сканирования РМ-08 (1 Гц) с частотой строк выходного изображения (4 Гц) [7]. На выходе БОС сигнал преобразуется в аналоговую форму и поступает на модулятор передатчика линии радиосвязи.

#### СКАНИРУЮЩАЯ АНТЕННАЯ СИСТЕМА

Сканирующая антенна системы РМ-08 разработана в ИРЭ НАНУ на основе принципов преобразования поверхностных волн в объемные [1, 3]. Антенна включает неподвижный рефлектор в виде вырезки из параболического цилиндра и сканирующий линейный облучатель, вынесенный за пределы апертуры, выполненный на основе диэлектрического волновода, связанного посредством электромагнитного поля с одной из дифракционных решеток из их набора, размещенного на вращающемся цилиндре вдоль его образующих [3]. Положение диаграммы направленности (ДН) антенны определяется параметрами взаимодействующей дифракционной решетки. При вращении цилиндра вокруг своей оси дифракционные решетки последовательно взаимо-

действуют с полем диэлектрического волновода и, как следствие этого, путем выбора параметров рассеивающих дифракционных решеток могут быть реализованы требуемые пространственные положения ДН, сектор и закон сканирования. Схематическое изображение антенны приведено на рис. 1.

Характерной особенностью выбранной электродинамической схемы антенны является наличие «клиновидной» связи между каждым из рассеивателей и линией поверхностных волн. Такая несимметричная связь приводит к тому, что искажения диаграммы направленности, характерные для антенн с боковой запиткой в области углов, близких к нормали к плоскости апертуры, в данной антенной конструкции выражены слабо и практически не влияют на характеристики принимаемого сигнала. Реализованное распределение поля вдоль облучателя близко к косинусоидальному. В ортогональной плоскости требуемая ДН облучателя формируется с помощью рупора, в который заключен диэлектрический волновод.

С целью исключения приема с направлений, соответствующих высшим гармоникам поверхностных волн, была ограничена максимальная величина периода рассеивателей. Это обстоятельство явилось причиной несимметричности углового сектора сканирования, составляющего  $+6^\circ \dots -24^\circ$  относительно нормали к плоскости апертуры. В рабочем положении плоскость апертуры расположена под углом  $45^\circ$  к надиру, что позволяет получать наилучшее, в среднем по полосе обзора, пространственное разрешение.

Требуемый порядок смены рассеивателей реализуется с помощью механического привода [2], выполненного на основе редуцированного шагового

двигателя. Синхронизация последнего от внешнего опорного источника обеспечивает построчную привязку данных радиометра к информации других систем, входящих в комплекс научной аппаратуры ИСЗ.

Для реализованных размеров зеркала  $1150 \times 580 \text{ мм}^2$ , при длине облучателя 950 мм, ширина диаграммы направленности по уровню 3 дБ составляет  $0.5^\circ \times 0.8^\circ$  при уровне боковых лепестков не хуже  $-17 \text{ дБ}$ . Для согласования рабочих углов наблюдения радиолокатора и радиометра сектор сканирования составляет  $30^\circ$  в диапазоне углов  $21^\circ$ — $51^\circ$  от надира. Частота сканирования — 1 строка в секунду.

Значительная длина облучателя вызывает заметный уровень его собственных потерь в 8-мм диапазоне волн ( $-0.8 \text{ дБ}$  с фидерным трактом), что может приводить к вариациям параметров выходной шкалы радиометра при изменении термодинамических температур облучателя и фидера в процессе эксплуатации. Поэтому, несмотря на независимость собственных потерь в облучателе антенны от углового положения луча, необходимо включение параметров антенного блока в алгоритм калибровки.

#### РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИЕМНИК

Радиометрический приемник выполнен по одноканальной супергетеродинной схеме с модулятором на входе. Сверхвысокочастотная часть приемного тракта разработана на базе волноводной техники с основным сечением волновода  $7.2 \times 3.4 \text{ мм}^2$ . Для реализации высокой чувствительности во входном тракте применен параметрический усилитель вырожденного типа с шумовой температурой  $T_{\text{ш}} \leq 300 \text{ К}$  [5]. Все активные СВЧ-элементы выполнены на полупроводниковых приборах. Центральная частота рабочей полосы —  $36.61 \text{ ГГц}$ , частота гетеродина выбрана равной  $37.5 \text{ ГГц}$ .

Так как антенная система обладает ярко выраженной дисперсией (углочастотный коэффициент составляет  $0.8^\circ$  на процент изменения частоты), для исключения приема излучения с «зеркального» направления ДН требуется введение в приемнике однополосного режима работы. С этой целью за счет рабочих характеристик параметрического усилителя, модулятора и ферритовых устройств, реализовано подавление сигнала в верхней боковой полосе приема порядка  $-30 \text{ дБ}$ .

Для уменьшения влияния дисперсии антенны на ширину ДН полоса приемника ограничена  $270 \text{ МГц}$ , для чего в тракте промежуточной частоты

установлен шестизвенный полосовой фильтр на встречных стержнях. Центральная частота фильтра —  $890 \text{ МГц}$ . Поскольку все остальные элементы тракта более широкополосны, характеристика фильтра определяет результирующую амплитудно-частотную характеристику системы.

В тракте низкой частоты осуществляются операции синхронной фильтрации, синхронного детектирования и интегрирования выходного сигнала. Выходной усилитель постоянного тока (УПТ) схемы низкочастотной обработки имеет два фиксированных значения коэффициента передачи, устанавливаемых по командам с Земли. При этом информация представляется в двух температурных масштабах: шкалы радиояркостных изображений соответствуют диапазонам температур  $110$ — $330 \text{ К}$  (для наблюдений океана и суши) или  $150$ — $250 \text{ К}$  (для наблюдений льдов). Кроме этого, по командам с Земли предусмотрена возможность смещения выходной шкалы радиометра относительно сетки входного аналого-цифрового преобразователя БОС, что позволяет (в случае необходимости) компенсировать составляющую систематической погрешности измерений, связанную с возможной ошибочной оценкой рабочей шумовой температуры антенны при ее наземной калибровке.

Структурная схема радиометрического приемника приведена на рис. 2.

#### КАЛИБРОВКА РМ-08

Калибровка радиометра осуществляется с помощью сигнала от эталонного шумового полупроводникового генератора (ГШ), подключенного к противоположному концу диэлектрического волновода облучателя. В течение калибровочной части цикла сканирования прием внешнего излучения исключается, для чего часть цилиндрической поверхности выполнена гладкой и не содержит рассеивателей, поэтому сигнал шумового генератора проходит по волноводу облучателя антенны на вход радиометрического приемника без какого-либо влияния со стороны внешних факторов.

Второй уровень калибровочного сигнала, соответствующий физической температуре входного тракта радиометра, создается собственным радиоизлучением аттенюатора, установленного в тракте ГШ; физические температуры облучателя и аттенюатора измеряются с помощью прецизионных датчиков температуры и передаются в общем потоке телеметрических данных.

Таким образом, калибровочные сигналы подаются на вход антенны; в результате ее облучатель и

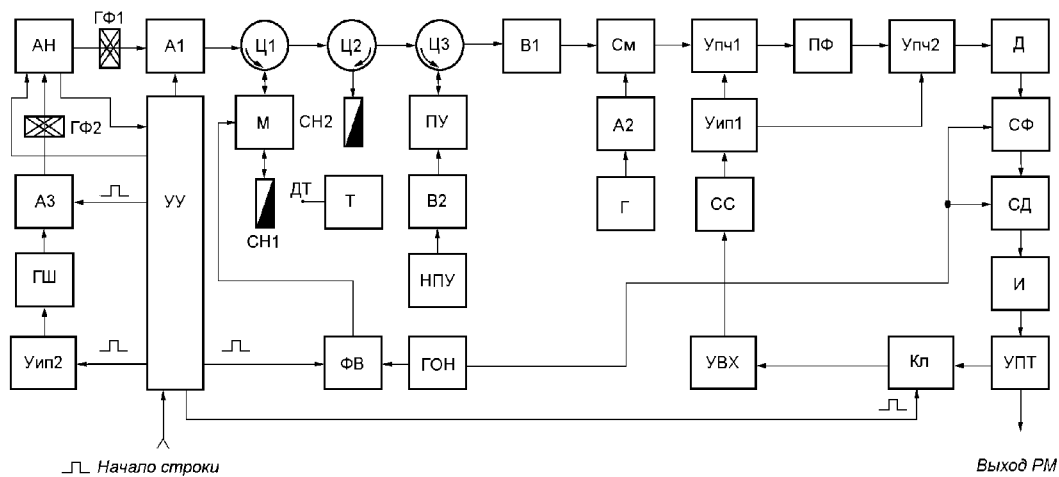


Рис. 2. Структурная схема РМ-08: А — аттенуатор; АН — антенна; В — вентиль; Г — гетеродин; ГОН — генератор опорного напряжения; ГФ — гермофланец; ГШ — генератор шума; Д — детектор; ДТ — датчик температуры; И — интегратор; Кл — ключ; М — модулятор; НПУ — накачка параметрического усилителя; ПУ — входной малошумящий параметрический усилитель; СМ — преобразователь частоты; СД — синхронный детектор; СН — согласованная нагрузка; СС — схема согласования; СФ — синхронный фильтр; Т — термостат; УВХ — устройство выборки-хранения; Уип1 — управляемый источник питания; УПТ — усилитель постоянного тока; Уип2 — усилитель промежуточной частоты; УУ — управляющее устройство; ФВ — фазовращатель; Ц — ферритовый циркулятор

фидерный тракт включаются в калибровочный цикл. Следует отметить, что в данной схеме облучатель антенны выполняет функции управляемого переключателя, в связи с чем из приемного тракта исключаются соответствующие волноводные элементы, что снижает общую шумовую температуру системы.

В РМ-08 предусмотрены два режима калибровки: диагностический и оперативный.

Диагностический режим включается перед началом рабочего цикла и состоит в измерении двух калибровочных уровней, длительностью 30 с каждый, при увеличенном времени интегрирования ( $\tau = 1$  с), с передачей данных как по телеметрическому каналу связи — для подтверждения правильного функционирования аппаратуры СКРМ, так по информационным радиолиниям с представлением результата в поле радиотеплового изображения — для проверки функционирования РМ канала БОС и линии передачи.

Режим оперативной калибровки синхронизирован с циклами вращения цилиндра облучателя и с другими системами радиофизического комплекса. В рабочей части цикла сканирования, соответствующей наблюдению земной поверхности, шумовой генератор выключен и второй вывод облучателя оказывается нагруженным на СВЧ нагрузку в виде аттенуатора с низким уровнем отражения.

Для формирования сигналов яркостной восьми-

градационной шкалы, располагаемой на выходном информационном бланке рядом с радиотепловым изображением и необходимым для оперативного анализа получаемой информации в пунктах приема, также используется шумовой сигнал калибровочного генератора, ослабленный в заданное для каждой градации количество раз управляемым  $p$ - $i$ - $n$ -аттенуатором. При этом фаза опорного сигнала, подаваемого на синхронный детектор, на время включения ГШ изменяется на  $180^\circ$ .

При оперативной калибровке используются два вида калибровочных сигналов. Первый — программно изменяемый уровень калибратора, используемый для формирования на изображении градационной яркостной шкалы, второй — фиксированный уровень излучения, необходимый для работы схемы стабилизации коэффициента передачи приемо-преобразовательного тракта.

Отклики на опорные калибровочные импульсы, несущие информацию о коэффициенте передачи, стробируются и с предварительного каскада УПТ поступают на схему автоматической стабилизации коэффициента передачи, где выделяется их среднее значение и сигнал рассогласования по отношению к опорному уровню используется для регулирования коэффициента усиления тракта.

Временная диаграмма работы основных устройств радиометрической системы приведена на рис. 3.

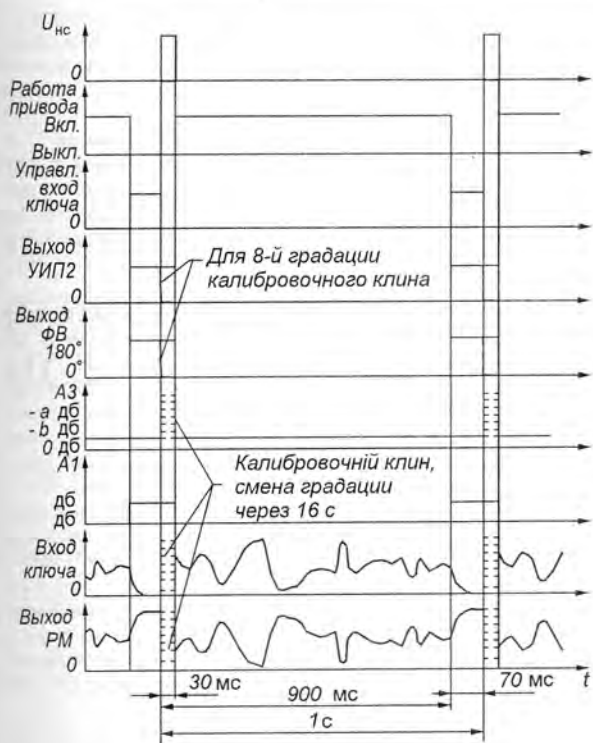


Рис. 3. Временная диаграмма работы основных устройств радиометрической системы

#### КОНСТРУКТИВНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ РМ-08

Конструктивно элементы системы размещены в трех блоках — двух герметичных — сверхвысокочастотном (СВЧ) и блоке питания и управления (БПУ), размещаемых на откидных панелях ИСЗ, и в блоке низкой частоты (БНЧ), установленном в аппаратном отсеке спутника. Блок СВЧ установлен на антенне и соединен с ее облучателем волноводными фидерами. Все его элементы размещены на термостабилизированной плите, теплоизолированной от кожуха блока. Для снижения теплообмена плиты за счет конвекции и излучения, свободный внутренний объем блока заполнен гранулами пенополистирола. Терморазвязывающие волноводные связи между термоплитой и кожухом выполнены из тонкостенного волновода из нержавеющей стали с серебряным покрытием. Гермоблок СВЧ имеет два волноводных гермофланца (вход радиометрического приемника и выход калибровочного генератора). В гермофланцах в качестве развязывающих элементов применены слюдяные пластины толщиной 0.04 мм, что обеспечило потери сигнала менее 0.1 дБ. Термостатирование активное, с рабочей температурой плиты 316 К при диапазоне изменения температур кожуха блока СВЧ 233—313 К. Датчик термостата установлен на эталонной нагрузке модулятора и обеспечивает точность стабилизации температуры 0.2 К.

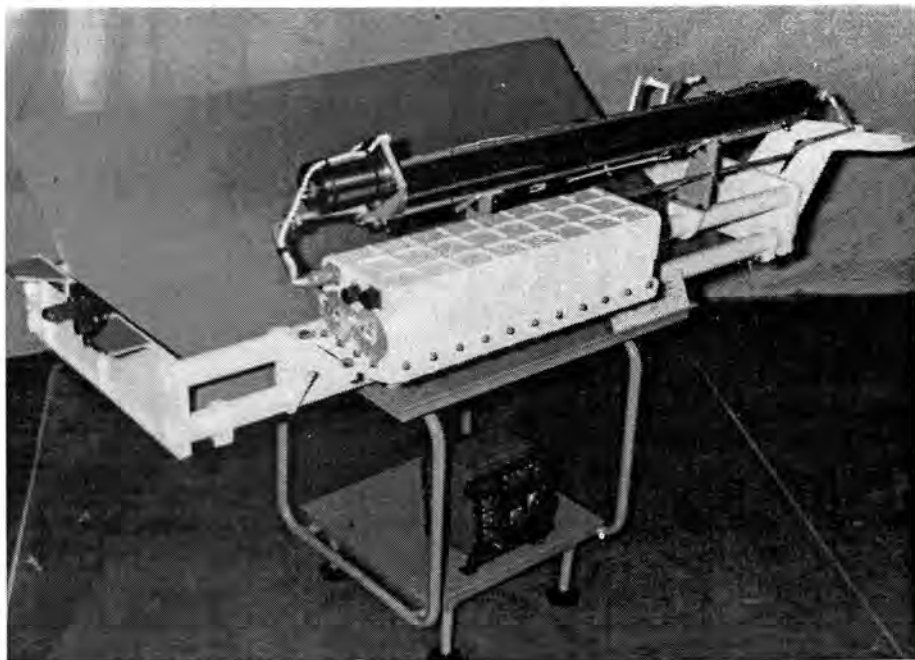


Рис. 4. Внешний вид антенной системы РМ-08 с блоком СВЧ (вверху) и блока БНЧ (внизу)

На рис. 4 представлен внешний вид антенной системы РМ-08 с блоком СВЧ (вверху) и блока БНЧ (внизу).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информативность комплексов дистанционного зондирования типа «Океан-01», «Сич-1» с пространственно совмещенными полосами обзора поверхности для радиолокационного, радиометрического и оптического датчиков подтверждена в ходе многочисленных научных экспериментов и оперативных наблюдений Земли из космоса. Опыт эксплуатации в составе этих комплексов радиометрических систем типа РМ-08 позволяет сделать вывод о целесообразности введения в состав бортовых аппаратурных комплексов сканирующих радиометрических систем со «средним» пространственным разрешением порядка 5—15 км. Существенного увеличения информативности следует ожидать при увеличении числа поляризационных и частотных каналов радиометрической системы, при повышении абсолютной точности измерений и улучшении пространственного разрешения, а также при проведении комплексной наземной тематической обработки данных, полученных датчиками разных типов. Функционирование РМ-08 в составе комплекса радиофизической аппаратуры также подтвердило эффективность примененных методов обзора пространства и калибровки, основанных на использовании дифракционных структур в качестве элементов приемного антенного раскрыва для сверхвысокочастотных радиометрических систем.

1. Андренко С. Д., Девятков Н. Д., Шестопалов В. П. Антенные решетки миллиметрового диапазона волн // Докл. АН СССР.—1978.—240, № 6.—С. 1340—1343.

2. А. с. 1251691 СССР, МКИ<sup>4</sup> G 01 S 13/95. Радиометр для оперативного дистанционного зондирования и блок сканирования / А. П. Пичугин, М. В. Бухаров, В. А. Комяк и др.—№ 3788385; Заявл. 25.01.85; Опубл. 22.02.86, Бюл. № 2.
3. Евдокимов А. П., Крыжановский В. В., Провалов С. А. Современное состояние проблемы сканирования лучом ДН в антеннах радио-метрических комплексов миллиметрового диапазона // Радиометрические методы и средства для исследований окружающей среды в миллиметровом диапазоне: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1988.—С. 160—166.
4. Калмыков А. И., Курекин А. С., Ефимов В. Б. и др. Радиолокатор бокового обзора ИСЗ «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса.—1985.—№ 3.—С. 76—83.
5. Корогод В. В., Берлин А. С., Струков И. А. Методы проектирования вырожденных параметрических усилителей для бортовых приемных систем миллиметрового диапазона волн // Научная аппаратура для космических исследований. — М.: Наука, 1987.—С. 114—121.
6. Селиванов А. С., Тучин Ю. М. Радиотелевизионный комплекс спутников «Метеор» для исследования природных ресурсов Земли // Исслед. Земли из космоса.—1981.—№ 5.—С. 28—34.
7. Фетисов А. Б. Особенности бортовой обработки информации при дистанционном зондировании природной среды // Радиофизические методы и средства для исследований окружающей среды в миллиметровом диапазоне: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1988.—С. 60—64.
8. Шестопалов В. П., Калмыков А. И., Комяк В. А. и др. Комплексные исследования природной среды Земли радиофизическим методом // Докл. АН СССР.—1985.—284, № 1.—С. 98—102.

---

#### SCANNING MICROWAVE RADIOMETER RM-08 OF THE «SICH-1» SATELLITE

V. A. Komyak, A. S. Levda, V. V. Rybin,  
S. A. Shilo, S. A. Yatsevich

We discuss design of the radiometer system RM-08 of the satellite «Sich-1», its structure, principles and engineering solutions used as the basis for its scanning and calibration systems.