

УДК 621.396.962

И.В. БУНЯЕВА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИСТАТИЧЕСКИХ РАДИОМЕТРОВ

Проведен сравнительный анализ основных характеристик бистатических и типовых сканирующих радиометров. В статье приведены графики зависимости предельно достижимой чувствительности от разрешающей способности для радиометрических систем дециметрового и миллиметрового диапазона. Проиллюстрирована относительная чувствительность бистатических радиометрических систем дециметрового и миллиметрового диапазона (по отношению к чувствительности сканирующего радиометра). Основное достоинство бистатических радиометров состоит в том, что они обеспечивают необходимое пространственное разрешение и чувствительность, используя антенные системы с очень малой физической поверхностью.

Ключевые слова: радиометр, интерферометр, чувствительность, разрешающая способность

Введение

Радиометры широко используются в задачах дистанционного зондирования Земли из космоса. В [1 – 6] предложен и исследован новый класс радиометрических систем – бистатических радиометров, отличительной особенностью которых является использование антенных систем с небольшой физической площадью. В настоящей статье представлен сравнительный анализ основных характеристик бистатических и типовых сканирующих радиометров.

1. Постановка задачи

Предельно-достижимые разрешающая способность и чувствительность радиометрических систем связаны друг с другом так называемым «радиометрическим соотношением неопределенности». Вид этого соотношения определяется конфигурацией системы и реализованными в ней алгоритмами обработки. Проведенное в [1 – 6] рассмотрение показывает принципиальную возможность создания на основе простейшей группировки из двух спутников радиометрических систем исследования природных ресурсов Земли из космоса с достаточно высокой разрешающей способностью и чувствительностью. При этом требуемые характеристики радиометрических систем достигаются с помощью антенн с небольшой физической площадью и, следовательно, с приемлемой для использования на искусственном спутнике Земли массой, а требования к координатно-временному обеспечению группировки оказываются не слишком обременительными и реализуемыми уже на современном уровне развития техники.

2. Результаты анализа радиометрических систем

Из рассмотренных в [1 – 6] трех вариантов реализации бистатических радиометрических систем наилучшие показатели качества (разрешающая способность, радиометрическая точность) имеют системы, использующие антенные решетки на концах базы. Вместе с тем, эти системы имеют наиболее сложные алгоритмы обработки и относительно громоздкие антенные устройства. В этом плане наиболее привлекательны радиометрические системы, реализующие технологию продольного синтеза апертуры – на каждом спутнике размещаются по две небольших (размером порядка длины волны принимаемого излучения), разнесенных на необходимое расстояние антенны и относительно простая аппаратура приема и обработки сигналов.

На рис. 1 приведены зависимости предельно достижимой чувствительности рассмотренных выше радиометрических систем от их разрешающей способности. Графики построены с использованием полученных в [1, 3] радиометрических соотношений неопределенности для следующих значений входящих в них параметров: ширина полосы обзора $Y = 1000$ км, шумовая температура системы $T_s = 250$ К, протяженность зоны наблюдения системы $X = 750$ км, орбитальная скорость движения спутников $v = 7,5$ км/с, полоса частот приемных трактов $2F = 19$ МГц. Такой набор параметров характерен для радиометрических систем, работающих в низкочастотной части микроволнового диапазона, реализация которых классическими способами вызывает наибольшие трудности в связи необходимостью

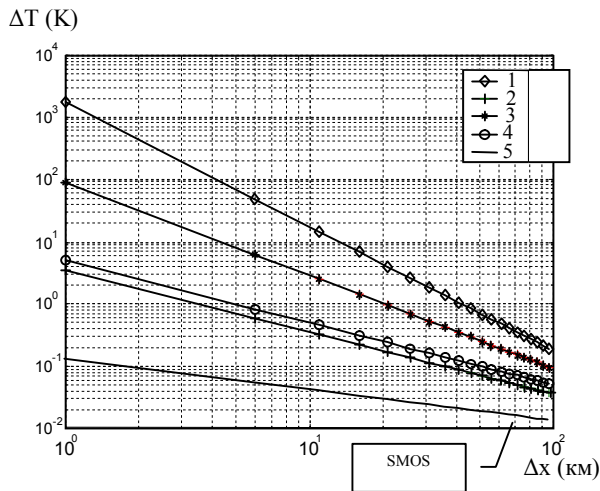


Рис. 1. Зависимость предельно достижимой чувствительности от разрешающей способности для радиометрических систем дециметрового диапазона:

- 1 бистатистическая радиометрическая система с продольным синтезом апертуры;
- 2 бистатистическая радиометрическая система с антенными решетками;
- 3 бистатистическая радиометрическая система с апертурными антеннами;
- 4 типовой сканирующий радиометр;
- 5 многолучевой радиометр

развертывания в космосе антенн больших геометрических размеров. К таким системам относятся, например, радиометрические системы глобального мониторинга влажности почвы и солености океана. Наиболее продвинутым проектом в этой области является миссия SMOS Европейского космического агентства [7]. Радиометрическая точность и разрешающая способность (1К, $50 \times 50 \text{ км}^2$), реализуемые этим проектом, с запасом и значительно проще реализуются также любым из рассмотренных вариантов бистатистических радиометров.

На рис. 2 приведены аналогичные зависимости для других параметров миссии: ширина полосы обзора $Y = 200 \text{ км}$, шумовая температура системы $T_s = 300 \text{ К}$, протяженность зоны наблюдения системы $X = 400 \text{ км}$, орбитальная скорость движения спутников $v = 7,5 \text{ км/с}$, полоса частот приемных трактов $2F = 400 \text{ МГц}$. Такой набор параметров характерен для радиометрических систем, работающих в высокочастотной (20 – 40 ГГц) части микроволнового диапазона, используемыми для мониторинга характеристик ледового и снежного покровов, определения направления и силы приводного ветра [8].

Требуемые здесь радиометрическая точность (2 – 3 К) и разрешающая способность (1 – 10 км), также находятся в пределах реализуемости рассмотренными бистатистическими радиометрическими системами.

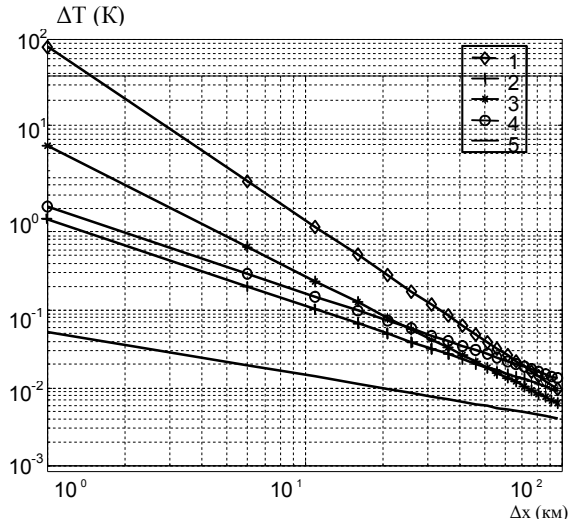


Рис. 2. Зависимость предельно достижимой чувствительности от разрешающей способности для радиометрических систем миллиметрового диапазона:

- 1 -бистатистическая радиометрическая система с продольным синтезом апертуры;
- 2 бистатистическая радиометрическая система с антенными решетками;
- 3 бистатистическая радиометрическая система с апертурными антеннами;
- 4 типовой сканирующий радиометр;
- 5 многолучевой радиометр

Графики на рис. 1, 2 иллюстративные, поскольку при их построении использовались параметры конкретной миссии. В этом плане более содержательной является зависимость относительной чувствительности χ рассмотренных выше радиометрических систем (по отношению к чувствительности наиболее распространенных сканирующих радиометров) от разрешающей способности. Соответствующие графики приведены на рис. 3. Приведенные на этом рисунке зависимости маркированы так же, как на рис. 1.

Из последнего рисунка видно, что бистатистическая радиометрическая система с антенными решетками даже превосходит по чувствительности сканирующий радиометр с той же разрешающей способностью (проигрыш отрицателен – $\chi = 1,5 \text{ дБ}$). Антенные устройства при этом имеют намного меньшую площадь и вес.

Радиометрические системы с апертурными антеннами и с продольным синтезом апертуры уступают по чувствительности сканирующему радиометру с той же разрешающей способностью. Однако этот проигрыш является платой за существенное, на несколько порядков, уменьшение площади и веса антенн. Поясним последнее утверждение на примере бистатистического радиометра с синтезированием апертуры.

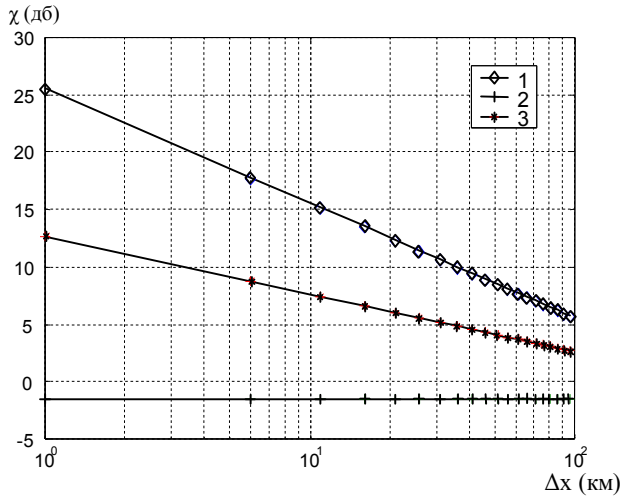


Рис. 3. Относительная чувствительность би статистических радиометрических систем (по отношению к чувствительности сканирующего радиометра):

- 1 би статистическая радиометрическая система с продольным синтезом апертуры;
- 2 би статистическая радиометрическая система с антенными решетками;
- 3 би статистическая радиометрическая система с апертурными антеннами

Геометрические размеры $L_x \times L_y$ антенн такой системы определяются длиной волны принимаемого излучения, размерами зоны видимости радиометра и высотой орбиты спутника

$$L_x \times L_y = (\lambda H)^2 / (X \times Y).$$

Общая площадь антенн радиометрической системы равна $S_\Sigma = 4L_x \times L_y$.

С другой стороны геометрические размеры $L_{0x} \times L_{0y}$ антенны сканирующего радиометра обратно пропорциональны разрешающей способности радиометра $L_{0x} \times L_{0y} = (\lambda H)^2 / (\Delta x \times \Delta y) = S_0$. Отношение площадей S_0 / S_Σ антенн является мерой выигрыша в массе антенных устройств и сложности их развертывания на орбите при переходе к новым технологиям обработки радиометрических сигналов. В рассматриваемом случае это отношение равно

$$S_0 / S_\Sigma = \frac{X \times Y}{4 \Delta x \times \Delta y}.$$

Подставляя в это соотношение, например, параметры миссии L – диапазона ($X=750$ км, $Y=1000$ км, $\Delta x = \Delta y = 35$ км), находим, что отношение площадей антенных устройств в данном случае равно $S_0 / S_\Sigma \sim 150$ – достаточно убедительный аргумент в пользу би статистических радиометрических систем.

Наиболее эффективно использование рассмотренных выше радиометрических систем на основе простейшей группировки спутников с некогерентным поперечным и когерентным продольным синтезированием апертуры в относительно низкочас-

тотной радиометрии. В низкочастотной части микроволнового диапазона создание зеркальных антенн для типовых сканирующих и многолучевых радиометров зачастую наталкивается на непреодолимые технические трудности. Поэтому практическая реализация рассмотренных методов обработки радиометрических сигналов позволит расширить области применения радиометрических систем ДЗЗ.

Использование полученных алгоритмов обработки радиотепловых сигналов в би статистическом радиометре позволяет существенно повысить разрешающую способность радиометрических систем в традиционных диапазонах длин волн (миллиметровых и сантиметровых), а также создавать радиометрические системы в еще не освоенных дециметровом и метровом диапазонах.

3. Практические примеры радиометрических систем

В качестве первого практического примера определим основные характеристики би статистического радиометра L – диапазона, предназначенного для определения влажности почвы и солености океана. В качестве исходных данных примем проектные характеристики системы SMOS европейского космического агентства [7]:

- ширина полосы обзора $Y=1000$ км;
- разрешающая способность на краю полосы обзора $\Delta S = 50 \times 50$ км²;
- радиометрическая чувствительность $\Delta T = 1$ К;
- шумовая температура системы $T_s = 250$ К;
- полоса частот приемного тракта $2F = 19$ МГц;
- несущая частота $f_0 = 1,43$ ГГц;
- высота орбиты спутника $H = 750$ км;
- скорость движения спутника $v = 7,5$ км/с.

Используя полученные в [1, 3] соотношения, находим основные характеристики би статистических радиометрических систем L – диапазона. Результаты расчетов сведены в табл. 1. В колонки 1, 2 и 3 помещены данные, относящиеся к радиометрическим системам с апертурными антеннами, антенными решетками и с синтезированием апертуры соответственно.

Здесь $R = (H^2 + Y^2 / 4)^{0,5}$ – расстояние от центра базы до края полосы обзора.

Отметим, что обычно [7] радиометрические системы имеют два канала для приема излучения с вертикальной и горизонтальной поляризациями. При этом обработка принимаемых сигналов осуществляется одной и той же аппаратурой с разделением во времени. Чувствительность при этом ухудшается на 3 дБ.

Таблица 1

Характеристики бистатистических радиометрических систем

Параметры системы	1	2	3
Длина антенны (интерферометра) $L_x = \lambda R / \Delta x$, м	3,78	3,78	3,78
Ширина антенны $L_y = \lambda H / Y$, м	0,16	0,16	0,16
Число элементов в антенной решетке	-	24	2
Размер элемента антенной решетки, м ²	-	0,16 × 0,16	0,16 × 0,2
Длина базы на основании (2.40) $D = \lambda_B R / \Delta y$, м	145	145	145
Суммарная площадь антенн, м ²	1,21	1,21	0,128
Длительность интервала обработки T, с	6	133	100
Чувствительность радиометра ΔT , К	0,33	0,07	0,5
Точность определения вектора базы $ \delta \mathbf{D} $, не хуже, м	6	6	6
Относительная нестабильность генераторов $ \delta f / f_0 $	$0,5 \times 10^{-10}$	10^{-12}	10^{-12}
Рассогласование шкал времени $ \delta t $, нс, не хуже	30	30	30

Таблица 2

Характеристики бистатистических радиометрических систем

Параметры системы	1	2	3
Длина антенны (интерферометра) $L_x = \lambda R / \Delta x$, м	1,28	1,28	1,28
Ширина антенны $L_y = \lambda H / Y$, м	0,03	0,03	0,03
Число элементов в антенной решетке	-	44	2
Размер элемента антенной решетки, м ²	-	0,03 × 0,03	0,03 × 0,045
Длина базы на основании (2.40) $D = \lambda_B R / \Delta y$, м	60	60	60
Суммарная площадь антенн, м ²	0,08	0,08	$0,5 \cdot 10^{-2}$
Длительность интервала обработки T, с	0,6	53,2	26,6
Чувствительность радиометра ΔT , К	0,43	0,07	2
Точность определения вектора базы $ \delta \mathbf{D} $, не хуже, м	0,3	0,3	0,3
Относительная нестабильность генераторов $ \delta f / f_0 $	$0,5 \cdot 10^{-10}$	10^{-12}	10^{-12}
Рассогласование шкал времени $ \delta t $, нс, не хуже	3	3	3

В качестве второго примера определим основные характеристики бистатистического радиометра миллиметрового диапазона, предназначенного для определения характеристик ледяного покрова Земли. За исходные примем проектные характеристики перспективной радиометрической системы миллиметрового диапазона [9]:

- ширина полосы обзора $Y = 200$ км;
- разрешающая способность на краю полосы обзора $\Delta S = 5 \times 5$ км²;
- радиометрическая чувствительность $\Delta T = 2$ К;
- шумовая температура системы $T_s = 300$ К;
- полоса частот приемного тракта $2F = 400$ МГц;
- несущая частота $f_0 = 18,7$ ГГц;
- высота орбиты спутника $H = 400$ км;
- скорость движения спутника $v = 7,5$ км/с.

Используя полученные в [1, 3] соотношения, находим основные характеристики бистатистических радиометрических систем миллиметрового диапазона.

Результаты расчетов сведены в табл. 2. В колонки 1, 2 и 3 помещены данные, относящиеся к радиометрическим системам с апертурными антеннами, антенными решетками и с синтезированием апертуры соответственно.

Отметим, что обычно в радиометрических системах ДЗЗ высокого разрешения основные проблемы возникают с реализацией соответствующих антенных устройств. Они составляют [9] 80 – 90% веса и до 95 – 99% объема инструмента. В рассмотренных выше системах антенные устройства несоизмеримо проще. В бистатистическом радиометре с синтезированием апертуры миллиметрового диапазона, например, на каждой аэрокосмической платформе размещается по две разнесенные на $\sim 1,3$ м антенны площадью $\sim 3 \times 3$ см² каждая. Учитывая также, что и электронная аппаратура приема и обработки радиометрических сигналов также функционально достаточно проста, в качестве аэрокосмических платформ могут использоваться небольшие микроспутники.

Заключение

Проведен сравнительный анализ основных характеристик бистатистических и типовых сканирующих радиометров.

На примере радиометрических систем дециметрового и миллиметрового диапазонов длин волн показано, что основное достоинство бистатистических радиометров состоит в том, что они обеспечивают

необходимые пространственное разрешение и чувствительность, используя антенные системы с очень малой физической поверхностью. Площадь антенных устройств составляет доли процента от площади антенны эквивалентного по характеристикам типового радиометра при сопоставимой сложности аппаратуры обработки.

Литература

1. Бунаяева И.В. Потенциальные возможности радиометрических систем дистанционного зондирования Земли на основе использования группировки спутников / И.В. Бунаяева, А.П. Верещак, А.А. Зеленский // *Радиотехника*. – 2006. – Вып. 144. – С. 258-268.

2. Бунаяева И.В. Радиометр с продольным синтезом апертуры для дистанционного зондирования Земли / И.В. Бунаяева, А.П. Верещак // *Радио-*

электронные и компьютерные системы. – 2006. – № 1 (13). – С. 5-12.

3. Бунаяева И.В. Бистатический радиометр с продольным синтезом апертуры / И.В. Бунаяева, А.П. Верещак, А.А. Зеленский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 2 (28). – С. 27-36

4. Бунаяева И.В. Бистатический радиометр с продольным синтезом апертуры для наблюдения поверхности Земли / И.В. Бунаяева, А.П. Верещак. – В кн.: *16-я Межд. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006): матер. конф.* [Севастополь, 11-15 сент. 2006 г.]. – Севастополь: Вебер, 2006. – С. 182-183.

6. Бунаяева И.В. Цифровая обработка сигналов в бистатическом радиометре для ДЗЗ / И.В. Бунаяева, А.П. Верещак. – В кн.: *НТК “Сучасні проблеми екологічної та техногенної безпеки регіонів”: матер. конф.* [Крым, Рыбачье, 2006 г.]. – Харьков, ХАИ, 2006. – С. 194-196.

Поступила в редакцию 20.01.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ БІСТАТИЧНИХ РАДІОМЕТРІВ

І.В. Бунаяева

Проведено порівняльний аналіз основних характеристик бістатичних і типових скануючих радіометрів. У статті наведені графіки залежності гранично досяжної чутливості від розв'язної здатності для радіометричних систем дециметрового та міліметрового діапазону. Проілюстровано відносну чутливість бістатичних радіометричних систем дециметрового та міліметрового діапазону (стосовно чутливості скануючого радіометра). Основне достоїнство бістатичних радіометрів полягає в тому, що вони забезпечують необхідний просторовий дозвіл і чутливість, використовуючи антенні системи з дуже малою фізичною поверхнею.

Ключові слова: радіометр, інтерферометр, чутливість, що вирішує здатність

COMPARATIVE ANALYSIS OF BISTATIC RADIOMETERS

I.V. Bunayeva

The comparative analysis of bistatic and conical scan radiometers are accomplished. The functional dependences of potential sensitivity from resolving ability of microwave and millimeter-wave bistatic, such as, scan radiometric systems are presented in the paper. The relative sensitiveness of the bistatic systems of aerophares decimetric and millimetric range is illustrated (in relation to the sensitiveness of sweepable radiometer). The main advantage of bistatic radiometers is a smaller antenna sizes in compare with conical scan radiometers with equal sensitivity.

Key words: radiometer, interferometer, sensitivity, resolving ability.

Бунаяева Ирина Владимировна – канд. техн. наук, ст.преп. каф. основ компьютерного конструирования, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков, e-mail: irinabunayeva@mail.ru.