

## Шестнадцатиполосный корреляционный радиометр для наблюдения межпланетных мерцаний

И. С. Фалькович, А. А. Гридин, Н. Н. Калиниченко, И. Н. Бубнов

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: falk@ira.kharkov.ua, kalinich@ira.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 16 ноября 2005 г.*

Приведены результаты разработки многополосного радиометра для исследования межпланетных мерцаний в декаметровом диапазоне длин волн. По сравнению с ранее применявшимися устройствами подобного типа описанный корреляционный радиометр не содержит преобразователей частоты и обладает чувствительностью, близкой к предельной для спектральных измерений на декаметровых волнах.

### Введение

Увеличение чувствительности радиоастрономических наблюдений является одной из важнейших задач при разработке приемной аппаратуры нового поколения. Как хорошо известно [1], флуктуационная чувствительность радиометра любого типа определяется шириной полосы пропускания  $\Delta f$  по высокой частоте и постоянной времени  $\tau$  интегратора, а также возможной расфазировкой  $\Delta\varphi$  двух каналов в случае корреляционного радиометра, основанного на перемножении выходных сигналов двух антенн:

$$\Delta T_{\min} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{T_{\text{сист}}}{\cos \Delta\varphi \cdot \sqrt{\Delta f \cdot \tau}},$$

где  $\Delta T_{\min}$  – минимально обнаружимое приращение шумовой температуры полезного сигнала,  $T_{\text{сист}}$  – шумовая температура системы.

При исследовании межпланетной среды методом мерцаний анализируются энергетические спектры флуктуаций мощности

сигналов космических радиоисточников. Повышение чувствительности в этом случае означает увеличение динамического диапазона спектра полезного сигнала относительно спектральной плотности аддитивного “белого” шума. Величина постоянной времени интегратора определяет верхнюю граничную частоту спектра аддитивного шума, поэтому увеличение динамического диапазона спектра межпланетных мерцаний возможно только за счет расширения полосы пропускания приемного устройства. Как было показано в работе [2], в декаметровом диапазоне ширина полосы частотной корреляции межпланетных мерцаний – не менее 10 МГц. Полное ее использование в радиометре обеспечит максимально возможную чувствительность. В целях повышения помехозащищенности наблюдений указанная полоса частот разбита на ряд сравнительно узких полос, что приводит к многополосному принципу построения радиометрического приемника. Такой радиометр можно назвать сверхширокополосным, поскольку полоса  $\Delta f \geq 10$  МГц соизмерима с декаметровым диапазоном радиоволн в целом.

В работе [2] описан трехполосный двухканальный корреляционный радиометр, содержащий шесть однотипных приемников, собранных по схеме прямого преобразования, в которой частота гетеродина равна центральной частоте полосы пропускания. Для перемножения выходных сигналов двух антенн используется пара приемников с общим гетеродином. Перемножение сигналов осуществляется аналоговым перемножителем на промежуточной частоте. Каждая пара приемников с прямым преобразованием и перемножителем образует корреляционный радиометр с полосой пропускания около 0,8 МГц. Основным недостатком радиометра такого типа является наличие большого количества гетеродинов при построении многополосных систем.

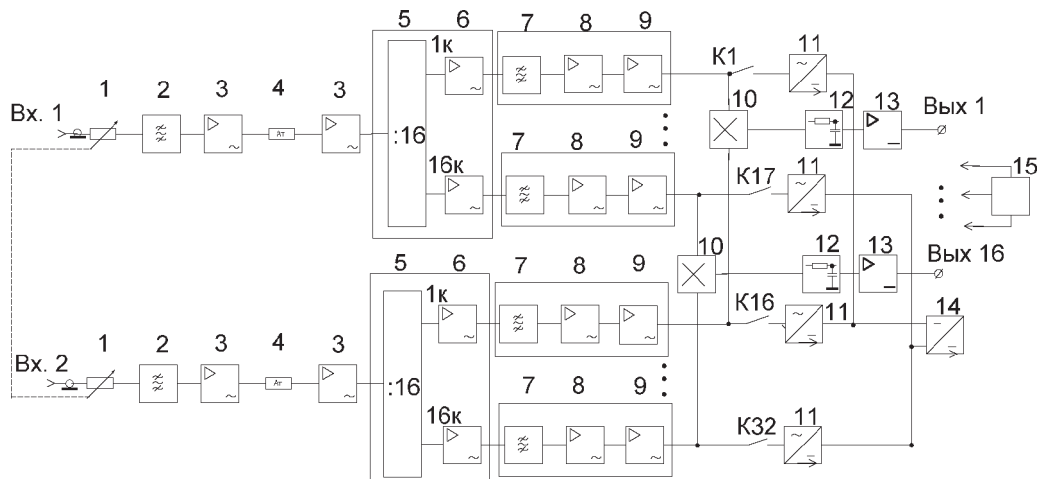
Современная элементная база позволяет разработать корреляционный радиометр без переноса спектра сигнала на промежуточную частоту и осуществлять перемножение на высокой частоте (перемножители фирмы ANALOG DEVICES типа AD835).

Для усиления сигналов в декаметровом диапазоне радиоволн наиболее подходящими являются усилители фирмы MOTOROLA типа MC1350, которые позволяют плавно изменять коэффициент усиления в широком диапазоне частот. На основе этих микросхем разработан двухканальный 16-полосный радиометр для наблюдения межпланетных мерцаний.

### Структура многополосного радиометра

Функциональная схема разработанного 16-полосного радиометра приведена на рис. 1, а его внешний вид – на рис. 2.

Выходные сигналы двух антенн поступают на входы 1 и 2 радиометра, ослабляются аттенюаторами 1, выполненными на герконовых реле типа РЭС-55, фильтруются полосовыми фильтрами 2 и после усиления усилителями 3, включенными через аттенюаторы 4, поступают на широкополосные 16-канальные делители мощности 5. Последние выполнены на широкополос-



**Рис. 1.** Функциональная схема радиометра:

1 – дискретный пятиразрядный аттенюатор  $0 \div 31$  дБ; 2 – полосовые фильтры ( $\Delta f = 16 \div 32$  МГц); 3 – усилители ВЧ ( $K_{yc} = 18$  дБ); 4 – сменные аттенюаторы  $0 \div 10$  дБ; 5 – широкополосные делители мощности на 16 направлений; 6 – усилители ВЧ ( $K_{yc} = 7$  дБ); 7 – полосовые фильтры ( $\Delta f = 0,6 \div 1,0$  МГц); 8 – усилители ВЧ ( $K_{yc} = 40$  дБ); 9 – усилители ВЧ с регулируемым коэффициентом усиления ( $K_{yc} = 0 \div 30$  дБ); 10 – аналоговые перемножители; 11 – коммутируемые детекторы ВЧ сигналов; 12 – интеграторы; 13 – усилители постоянного тока с регулируемым коэффициентом усиления ( $K_{yc} = 32 \div 50$  дБ); 14 – двухканальный блок индикации уровня сигналов на входах перемножителя; 15 – блок питания и управления

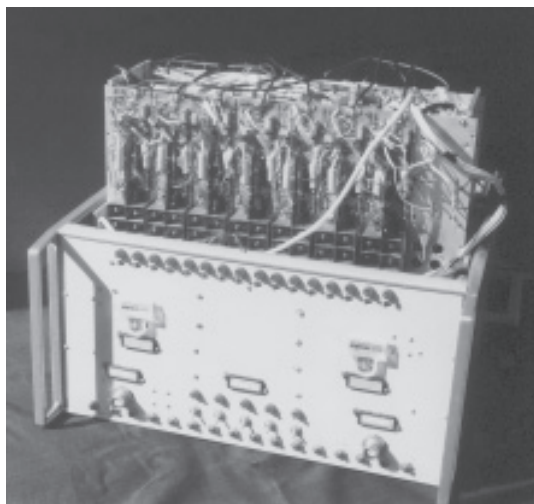


Рис. 2. Внешний вид радиометра

ных трансформаторах типа длинной линии с разными волновыми сопротивлениями, что позволило исключить промежуточные согласующие трансформаторы, уменьшить общее число трансформаторов с 30 до 20 и, следовательно, снизить в 1.5 раза потери в каждом канале. При разработке делителей особое внимание было уделено равенству амплитуд и фаз сигналов на их выходах. Измерения амплитудно-фазового распределения на выходах делителей 5 показали, что в диапазоне рабочих частот  $16 \div 30$  МГц разброс фаз составляет  $\pm 5^\circ$ , разброс амплитуд –  $\pm 0.3$  дБ. Для развязки выходов делителей с несогласованными вне полосы пропускания входами фильтров 7 установлены широкополосные усилители высокой частоты 6 с гибридными разветвителями в обратной связи.

После деления на 16 каналов широкополосные сигналы каждой из антенн проходят через узкополосные фильтры 7 с полосами пропускания от 0.6 до 1.0 МГц, перекрывающимися на уровне –3 дБ. Амплитудно-частотные характеристики фильтров 7 показаны на рис. 3. Значения полос пропускания указаны в табл. 1.

Из рис. 3 видно, что часть частотного диапазона не используется из-за постоянно присутствующих радиовещательных

Таблица 1. Значения полос пропускания радиометра

№ полосы	$f_{cp}$ , МГц	$\Delta f$ , МГц
1	16.3	0.6
2	16.9	0.6
3	17.5	0.6
4	18.1	0.6
5	18.7	0.6
6	19.3	0.6
7	19.9	0.6
8	20.6	0.8
9	21.4	0.8
10	22.6	0.8
11	23.4	0.8
12	24.2	0.8
13	25.0	0.8
14	25.8	0.8
15	28.5	1.0
16	29.5	1.0

помех в окрестности 22 и 27 МГц. Каждая из сформированных полос усиливается двумя усилителями высокой частоты 8 и 9, выполненными на микросхемах типа МС1350. Усилители 8 имеют фиксированный коэффициент усиления около 40 дБ, коэффициент передачи усилителей 9 можно регулировать в пределах  $0 \div 30$  дБ. Далее усиленные сигналы двух антенн поступают на перемножители 10, интегрируются в интеграторах 12 с постоянной времени  $\tau = 0.1$  с и усиливаются усилителями постоянного тока 13. Для обеспечения линейного режима работы перемножителя напряжение шумового сигнала на его входах, как показано ниже, не должно превышать 0.7 В. Для контроля этого уровня используется система, состоящая из 32 коммутируемых детекторов ВЧ сигнала 11 с устройством индикации 14. Наличие такой системы контроля позволяет оперативно контролировать уровень сигнала в любой из 16 полос. Питание приемника и управление его режимами осуществляется с помощью блока 15.

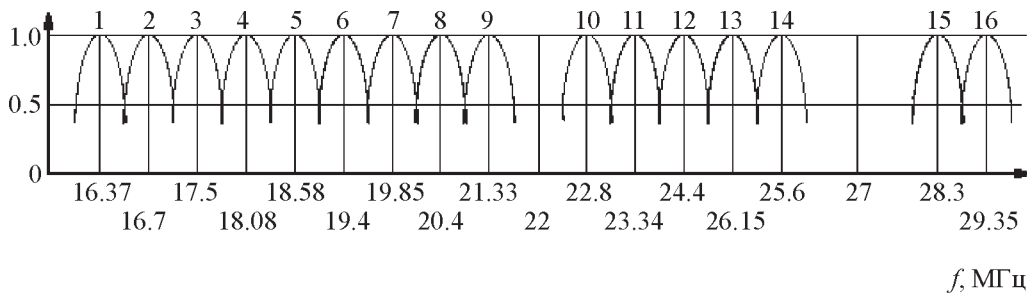


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики фильтров 7

### Результаты измерения основных параметров

В процессе лабораторных испытаний исследовались следующие параметры радиометра:

- динамический диапазон при различной структуре широкополосного усиления;
- степень идентичности фазо-частотных характеристик двух каналов;
- линейность каналов при различных значениях уровня галактического фона и полезного сигнала на входах перемножителя.

Динамический диапазон  $D$  радиометра определялся двухчастотным методом по интермодуляциям третьего порядка. Измерения проводились для двух вариантов широкополосного усиления. Для схемы радиометра, изображенной на рис. 1, динамический диапазон составил 87 дБ при ослаблении аттенюатора 1 – 8 дБ. Если на входах радиометра оставить по одному усилителю 3, то  $D = 89$  дБ. Таким образом, динамический диапазон радиометра полностью определяется линейностью входного широкополосного усилителя.

Аппаратурное уменьшение чувствительности корреляционного радиометра связано, в основном, с различием фазо-частотных характеристик  $\Delta\varphi(f)$  двух каналов, поскольку выходной сигнал радиометра пропорционален  $\cos \Delta\varphi$  [1]:

$$U_{\text{вых}}(\Delta\varphi) = U_{\text{вх1}} U_{\text{вх2}} K \cos \Delta\varphi,$$

где  $U_{\text{вх1}}$ ,  $U_{\text{вх2}}$ , – напряжения полезного сигнала на входах перемножителя,  $K$  – коэффициент передачи перемножителя,  $\Delta\varphi$  – разность фаз входных сигналов. Несовпадение

амплитудно-частотных характеристик легче устраняется при настройке и в меньшей степени влияет на результирующий радиометрический выигрыш.

Степень идентичности фазо-частотных характеристик двух каналов радиометра измерялась с помощью генератора шума путем поочередного включения на входы 1 и 2 отрезка кабеля длиной 92 см, что соответствует разности фаз  $\Delta\varphi = 46^\circ$  на частоте 27 МГц. До и после искусственной расфазировки каналов на указанную величину  $\pm\Delta\varphi$  измерялись уровни выходных сигналов радиометра  $U_{\text{вых}}(\Delta\varphi = 0)$ ,  $U_{\text{вых}}(\Delta\varphi)$ ,  $U_{\text{вых}}(-\Delta\varphi)$ . Разность этих уровней определяет степень идентичности сквозной фазо-частотной характеристики радиометра. Результаты измерений приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что средняя по всем полосам степень асимметрии каналов не превышает 15%, что не приведет к сколько-нибудь заметному уменьшению радиометрического выигрыша.

Линейность радиометра по шумовому сигналу при различных уровнях галактического фона  $U_{\text{ф}}$  и полезного сигнала  $U_{\text{с}}$  на входах перемножителя измерялась с помощью имитатора межпланетных мерцаний, описанного в [2]. Линейность оценивалась по степени отклонения значения реального коэффициента передачи от расчетного при введении на входах радиометра ослабления 10 дБ. Результаты измерений приведены в табл. 3, где  $U_{\text{вых}}$ ,  $U_{\text{вых}}^{-10 \text{ дБ}}$  – напряжения на выходе радиометра до и после введения ослабления.

Как следует из табл. 3, при проведении натуральных экспериментов суммарные напряжения сигналов  $U_{\Sigma}$  на входах перемножителя не должны превышать 0.7 В, когда отклонение от линейного закона составляет 0.5%.

**Таблица 2.** Фазо-частотная неидентичность каналов радиометра

№ канала	$f_0$ , МГц	$U_{\text{ВЫХ}}(\Delta\varphi=0)$ , В	$\cos \Delta\varphi$	$U_{\text{ВЫХ}}(\Delta\varphi=0) \times \cos \Delta\varphi$ , В	$U_{\text{ВЫХ}}(\Delta\varphi)$ , В	$U_{\text{ВЫХ}}(-\Delta\varphi)$ , В
1	16.3	4.5	0.91	4.10	4.0	3.8
2	16.9	4.2	0.90	3.78	3.5	3.8
3	17.5	5.0	0.89	4.45	4.4	4.8
4	18.1	5.4	0.88	4.75	4.9	5.1
5	18.7	5.3	0.877	4.64	4.5	4.9
6	19.3	4.8	0.87	4.17	3.9	4.1
7	19.9	5.5	0.86	4.73	4.8	4.2
8	20.6	5.02	0.85	4.46	4.1	4.4
9	21.4	5.5	0.84	4.62	4.3	4.8
10	22.6	6.7	0.82	5.49	5.1	5.8
11	23.4	5.0	0.81	4.05	3.8	4.0
12	24.2	6.8	0.79	5.37	4.8	4.9
13	25.0	5.5	0.78	4.29	4.5	4.3
14	25.8	5.9	0.77	4.50	4.7	4.1
15	28.5	6.3	0.72	4.53	4.1	4.6
16	29.5	5.6	0.70	3.92	4.02	3.7

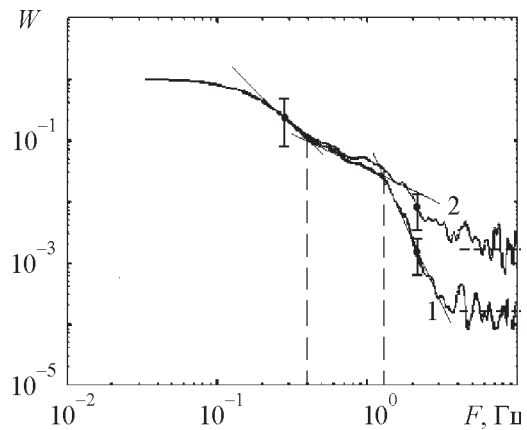
**Таблица 3.** Линейность радиометра по шумовому сигналу

$U_{\phi}$ , В	$U_c$ , В	$U_{\Sigma} = \sqrt{U_c^2 + U_{\phi}^2}$ , В	$U_{\text{ВЫХ}}$ , В	$U_{\text{ВЫХ}}^{-10 \text{ дБ}}$ , В	$\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}^{-10 \text{ дБ}}}$
0.55	0.5	0.7	10.25	1.03	9.95
0.85	0.5	1.0	10.25	1.11	9.23

**Результаты испытаний радиометра**

Высокая эффективность разработанного 16-полосного двухканального радиометра для наблюдения межпланетных мерцаний была подтверждена в ходе радиоастрономических экспериментов, проведенных на радиотелескопе УРАН-2 [3] (г. Полтава). Антенна радиотелескопа УРАН-2 имеет сравнительно небольшую эффектив-

ную площадь и увеличение чувствительности в этом случае является особенно актуальным. Наблюдался квазар 3С380, имеющий плотность потока излучения около 300 Ян на частоте 25 МГц. На рис. 4 показаны энер-



**Рис. 4.** Энергетические спектры мерцаний квазара 3С380. Кривая 1 – 10 частотных полос, кривая 2 – 1 полоса

гетические спектры межпланетных мерцаний, полученные по реализации длительностью 30 с при использовании одной полосы пропускания (кривая 2) и десяти полос (кривая 1). Расширение частотной полосы в десять раз должно привести к увеличению на порядок динамического диапазона спектра мерцаний, что и отражает рис. 4, на котором горизонтальными пунктирными линиями указаны средние уровни спектральной плотности аддитивных шумов.

### Заключение

В заключение отметим, что максимальное продление измеряемого спектра в область высоких флуктуационных частот  $F > 1$  Гц крайне желательно при исследовании струйной структуры солнечного ветра [4]. Как отмечено в этой статье, теоретический спектр мерцаний  $W(F)$  можно представить в виде взвешенной суммы  $C_1W_1(F) + C_2W_2(F)$  спектров  $W_1(F)$  и  $W_2(F)$ , соответствующих двум потокам межпланетной плазмы с разными скоростями и пространственными спектрами флуктуаций электронной концентрации. На кривой 1 рис. 4 хорошо видны изменения наклонов спектра на частотах 0.4 и 1.3 Гц, отмеченные прямыми линиями и являющиеся следствием двух потоков с разными параметрами [4]. На кривой 2 эти изменения менее различимы. Кроме того, недостаточно большой динамический диапазон спектра мерцаний в случае кривой 2 приводит к аномальному уменьшению наклона спектра на частотах, превышающих 1.3 Гц. Это убедительно доказывает целесообразность сверхширокополосного приема при исследовании параметров солнечного ветра.

Настоящая работа выполнялась при частичной финансовой поддержке гранта INTAS 03-5727.

### Литература

1. Краус Дж. Д. Радиоастрономия. – М.: Советское радио, 1973. – 456 с.
2. Фалькович И. С., Калиниченко Н. Н., Гридин А. А., Бубнов И. Н. О возможности широкополосных наблюдений межпланетных мерцаний на декаметровых волнах // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, №2. – С. 121-129.
3. Мень А. В., Шарькин Н. К., Захаренко В. В. и др. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УРАН-2 // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, №4. – С. 345-356.
4. Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Калиниченко Н. Н. и др. Вариации параметров струйной структуры солнечного ветра на расстояниях более 1 а. е. в 2003-2004 годах // Радиофизика и радиоастрономия. – (В печати).

### Шістнадцатиполосний кореляційний радіометр для спостереження міжпланетних мерехтінь

**І. С. Фалькович, А. О. Грідін,  
М. М. Калиниченко, І. М. Бубнов**

Наводяться результати розробки багатосмугового радіометра для спостереження міжпланетних мерехтінь в декаметровому діапазоні довжин хвиль. Порівняно з раніше використовуваними пристроями подібного типу описаний кореляційний радіометр не має перетворювачів частоти та має чутливість, близьку до граничної для спектральних вимірювань на декаметрових хвилях.

### Sixteen-Band Correlation Radiometer for IPS Observations

**I. S. Falkovich, A. A. Gridin,  
N. N. Kalinichenko, and I. N. Bubnov**

The design of a multi-band radiometer for interplanetary scintillation (IPS) observations at the decameter wavelengths is described. Against the similar devices used earlier, this correlation radiometer uses no frequency converters and has the sensitivity close to the limiting one for the spectral observations at the decameter wavelengths.