

Частотная декорреляция ионосферных мерцаний радиоисточника Кассиопея А в диапазоне 20 ÷ 30 МГц

И. С. Фалькович, А. А. Коноваленко, Н. Н. Калиниченко,
И. Н. Бубнов, А. Лекашо¹, Х. О. Рукер²

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

*¹Парижская обсерватория, Медон, Франция
E-mail: alain.lecacheux@obspm.fr*

*²Институт космических исследований, Грац, Австрия
E-mail: helmut.rucker@oeaw.ac.at*

Статья поступила в редакцию 8 ноября 2004 г.

Представлены результаты наблюдений мерцаний радиоисточника Кассиопея А в диапазоне рабочих частот 20 ÷ 30 МГц. Анализ экспериментальных данных показал, что интервал высокой частотной корреляции ионосферных мерцаний не превышает 6 МГц для дневных и ночных наблюдений. Поскольку в этом диапазоне межпланетные мерцания компактных радиоисточников коррелированы, предлагается использовать разницу в ширинах интервалов частотной корреляции для разделения ионосферных и межпланетных мерцаний.

Введение

Наблюдения мерцаний на неоднородностях ионосферной и межпланетной плазмы далеких космических источников имеют уже полувековую историю [1-3]. Тем не менее и в настоящее время они остаются одним из наиболее простых и эффективных методов исследования указанных сред. В частности, оказывается возможным определить скорость неоднородностей и показатель степени их спектра, а в случае наблюдения большого числа источников и пространственное распределение этих параметров. Долгое время методом мерцаний межпланетная плазма исследовалась только на метровых и более коротких волнах [4]. С конца семидесятых годов прошлого века такие измерения активно проводятся на декаметровых волнах. Особенно они эффективны на больших элонгациях $\epsilon > 90^\circ$, где мерцания компактных радиоисточников достигают максиму-

ма в декаметровом диапазоне, а мерцания на метровых и более коротких волнах очень слабые [5, 6]. При этом угловые размеры источников должны быть $\theta < 4''$. Между тем радиоисточники с такими размерами мерцают и на неоднородностях ионосферы [6]. В связи с вышесказанным остро стоит вопрос разработки критериев разделения ионосферных и межпланетных мерцаний. В работе [5] показано, что одним из таких критериев может служить различие в ширинах спектров мерцаний интенсивности радиоисточника на ионосфере и межпланетной плазме. Наблюдавшиеся ионосферные мерцания оказались более узкополосными, чем межпланетные, частоты среза фильтра Френеля составляют соответственно порядка 0.01 и 0.1 Гц. Проведенные в [7] многочастотные наблюдения мерцаний радиоисточников 3С144 и 3С196 позволили установить, что на больших элонгациях $100 \div 170^\circ$ интервал частотной корреляции межпланетных мер-

цаний, по уровню 0.8 в частотном диапазоне 20 ÷ 30 МГц, превышает 10 МГц. Что касается ионосферных мерцаний, то ограниченность статистического материала по наблюдению радиоисточника Кассиопея А не позволила в этой работе сделать однозначный вывод. Частотная корреляция флуктуаций интенсивности, вызванных неоднородностями ионосферы, исследовалась на метровых волнах в [8, 9] и на декаметровых волнах в [10, 11]. В последних двух работах были оценены коэффициенты корреляции на основе анализа мерцаний радиоисточника Кассиопея А, наблюдавшихся на слабонаправленной антенне, что, безусловно, идеологически правильно для изучения частотной корреляции ионосферных мерцаний как таковых. Но полученные таким образом результаты представляют ограниченный интерес для наблюдателя межпланетных мерцаний, который вынужден использовать остронаправленные антенны для приема слабых сигналов далеких галактик и квазаров. Целью настоящей работы является оценка интервала частотной корреляции ионосферных мерцаний в диапазоне 20 ÷ 30 МГц при использовании остронаправленной антенны.

Аппаратура и методика наблюдений

В течение полугода, с октября 1999 г. по февраль 2000 г., проводились измерения мерцаний на радиотелескопе УТР-2 с использованием его штатного комплекта аппаратуры [12]. Для получения результирующей диаграммы направленности использовалось перемножение выходных сигналов антенны “Север-Юг” и ортогональной ей антенны “Запад-Восток”. Наблюдения велись на 6 разнесенных частотах в диапазоне 20 ÷ 30 МГц ($f_1 = 19.9$ МГц, $f_2 = 23.4$ МГц, $f_3 = 24.3$ МГц, $f_4 = 25.6$ МГц, $f_5 = 28.1$ МГц, $f_6 = 29.3$ МГц), в пятилучевом режиме. Борьба с помехами искусственного происхождения обеспечивалась путем непрерывного использования во время наблюдений широкополосного анализатора спектра Hewlett-Packard и соответствующей коррекции рабочих частот. Приемные устройства имели полосу пропускания 3 кГц и постоянную времени 3.5 с. Интенсивность сигнала на выходе радиометра

оцифровывалась и использовалась для дальнейшей обработки.

В качестве просвечивающего источника был выбран радиоисточник Кассиопея А с плотностью потока (48000 ± 2000) Ян на частоте 25 МГц и угловыми размерами 4'. Радиоисточник наблюдался сессиями по 5 дней каждый месяц в дневные, вечерние и ночные часы. Как правило, длительность скана была равна 4 мин, что обеспечивало прохождение источника через диаграмму направленности радиотелескопа даже в случае сильной ионосферной рефракции. Для оценки дисперсии шума вне источника длительность скана периодически увеличивалась до 20 ÷ 30 мин.

Результаты экспериментов

В результате проведенных экспериментов удалось получить около 100 часов записей наблюдений радиоисточника, не искаженных помехами. Поскольку характеристики мерцаний на ионосферных неоднородностях в средних широтах обычно зависят от времени суток [13], мы разбили все записи на три группы:

- 1) дневные часы (все часы светлого времени суток, за исключением 2 часов после восхода солнца и 2 часов до захода солнца);
- 2) ночные часы (все часы темного времени суток, за исключением 2 часов после захода солнца и 2 часов до восхода солнца);
- 3) утренние и вечерние часы (все остальное время суток).

Индекс и появляемость ионосферных мерцаний

На первом этапе обработки для всех шести частот оценивался индекс мерцаний радиоисточника на временных интервалах длительностью 120 с по формуле:

$$m = \sqrt{\frac{\sigma_{on}^2 - \sigma_{off}^2}{I^2}}, \quad (1)$$

где σ_{on}^2 , σ_{off}^2 – дисперсии флуктуаций интенсивности сигнала, когда антенна направлена на источник и область вблизи источника соответственно; I – средняя интенсив-

ность сигнала на анализируемом временном интервале. В условиях слабых мерцаний ($m \leq 0.3$) индекс имел частотную зависимость вида $f^{-1.3}$, что соответствует показателю степени спектра ионосферных неоднородностей 3.2 [14]. Для сильных мерцаний ($m > 0.3$) зависимость индекса от частоты в среднем была более слабой, $f^{-0.8}$.

Появляемость мерцаний в процентах обычно определяют по формуле:

$$P_{scint} = \frac{T_m}{T} \cdot 100, \quad (2)$$

где T_m – отрезок времени, в течение которого наблюдались флуктуации интенсивности сигнала с индексом мерцаний, большим некоторого порогового значения (в нашей работе равного относительной среднеквадратичной погрешности определения индекса мерцаний на частоте 25 МГц); T – общая длительность наблюдений.

Анализ экспериментальных данных показал, что появляемость мерцаний с индексом $m > 0.05$ на частоте 25 МГц разная для каждой из 3 групп записей: в дневные часы $P_{scint} \approx 20\%$, в ночные часы $P_{scint} \approx 85\%$, в утренние и вечерние часы $P_{scint} \approx 40\%$. На рис. 1 показаны примеры прохождений

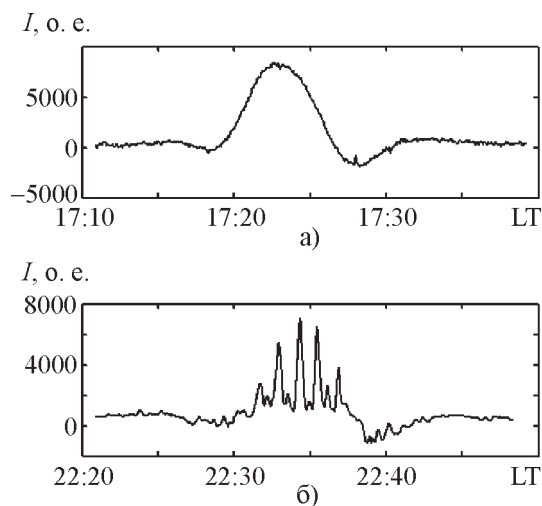


Рис. 1. Примеры прохождений радиосточника Кассиопея А через диаграмму направленности радиотелескопа УТР-2 в отсутствие (а) и при наличии (б) мерцаний с индексом $m > 0.05$

радиосточника Кассиопея А через диаграмму направленности радиотелескопа УТР-2 в отсутствие и при наличии мерцаний с индексом $m > 0.05$.

Интервал частотной корреляции ионосферных мерцаний

Дальнейшая обработка состояла в вычислении для каждой пары частот $f_1, f_2; f_1, f_3; f_1, f_4; f_1, f_5; f_1, f_6$ коэффициентов корреляции в совпадающие моменты времени по формуле:

$$\rho = \frac{\overline{s_1(t)s_i(t)}}{\left((\sigma_{on_1}^2 - \sigma_{off_1}^2)(\sigma_{on_i}^2 - \sigma_{off_i}^2) \right)^{1/2}}, \quad (3)$$

$$i = 2, 3, \dots, 6,$$

где $s_1(t)$ и $s_i(t)$ – флуктуации интенсивности сигнала на частотах f_1 и f_i (черта сверху означает усреднение по времени); $\sigma_{on_1}^2, \sigma_{off_1}^2$ – дисперсии флуктуаций интенсивности сигнала на частоте f_1 , когда антенна направлена на источник и область галактического фона вблизи него, соответственно; $\sigma_{on_i}^2, \sigma_{off_i}^2$ – аналогичные дисперсии на частоте f_i .

Далее строились зависимости $\rho = \rho(\Delta f)$, где $\Delta f = f_i - f_1$.

В качестве примера на рис. 2 показаны такие зависимости для девяти двухминутных интервалов наблюдений, проведенных с 14:30 до 15:30 местного времени 09.10.1999 г. Для оценки ширины интервала высокой частотной корреляции примем в качестве порогового значения $\rho = 0.8$, тогда соответствующие значения Δf для каждой кривой на рис. 2 и для всех других интервалов наблюдений могут быть представлены в виде гистограмм (см. рис. 3). Выбранное пороговое значение коэффициента корреляции $\rho = 0.8$ позволяет сравнить результаты настоящей работы с результатами, полученными в [7] для межпланетных мерцаний, а также определить ширину частотного интервала, в котором возможно суммирование выходных сигналов отдельных частотных каналов для повышения чувствитель-

ности измерений. Видно, что в дневные и ночные часы наблюдений гистограмма имеет ярко выраженный максимум при $\Delta f = 1$ МГц. Однако имеется и отличие. Если в дневные часы нет реализаций процесса мерцаний с коэффициентом корреляции $\rho \geq 0.8$ на частотах, отличающихся

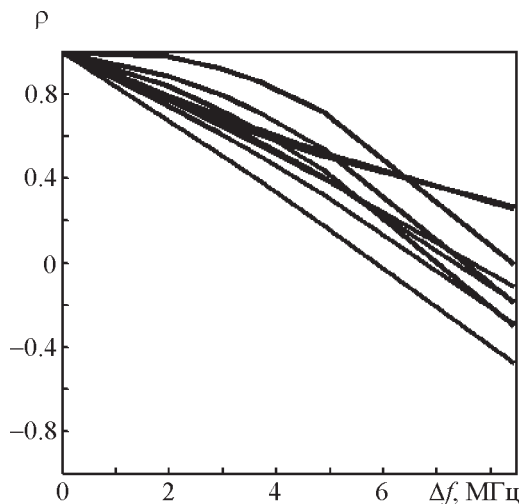


Рис. 2. Зависимости коэффициента корреляции от разности рабочих частот для 9 временных реализаций мерцаний радиостанции Кассиопея А, зарегистрированных с 14:30 до 15:30 местного времени 09.10.1999 г.

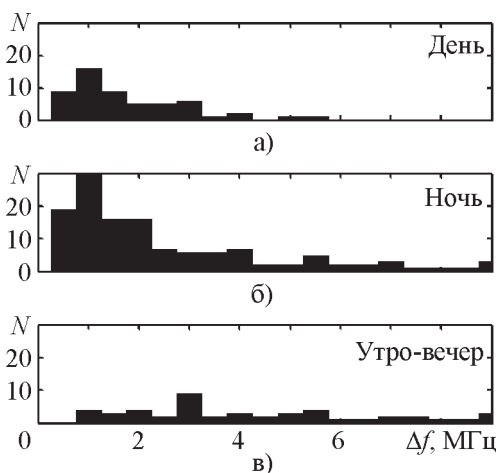


Рис. 3. Гистограмма значений разности рабочих частот Δf , для которых значение коэффициента корреляции ионосферных мерцаний на двух частотах $\rho \geq 0.8$

более, чем на 6 МГц, то ночью такие реализации появляются, хотя они и немногочисленны (около 8 %). Гистограмма для утренних и вечерних часов наблюдения не имеет явно выраженного максимума.

Природа частотной декорреляции ионосферных мерцаний

Анализ временных реализаций на разных частотах показал, что причиной декорреляции ионосферных мерцаний в значительном числе случаев было смещение дифракционной картины мерцаний на разных частотах друг относительно друга вследствие рефракции на крупномасштабных ионосферных неоднородностях. Последнее утверждение иллюстрируется рис. 4. Видно, что смещение и индекс мерцаний уменьшаются с ростом частоты. Однако для формулировки критерия разделения межпланетных и ионосферных мерцаний не столь важно, что стало причиной декорреляции, а важны ширина интервала корреляции и ее статистические характеристики.

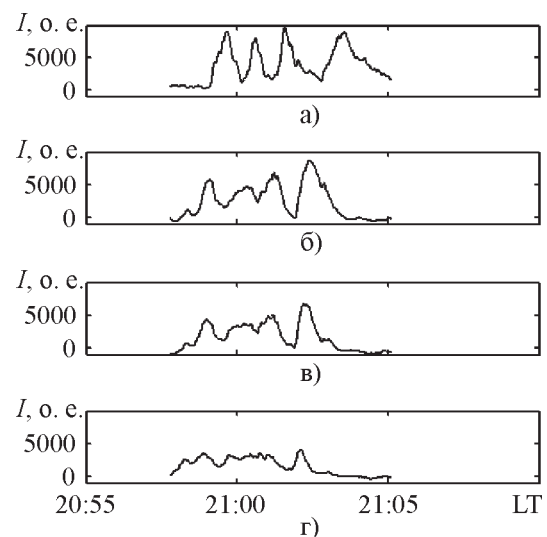


Рис. 4. Смещение дифракционной картины мерцаний на разных частотах вследствие рефракции на крупномасштабных ионосферных неоднородностях: а) 19.9 МГц, б) 23.4 МГц, в) 24.3 МГц, г) 25.6 МГц

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что при наблюдениях радиоисточников в дневные часы ширина интервала высокой частотной корреляции ионосферных мерцаний ($\rho \geq 0.8$) в совпадающие моменты времени в диапазоне 20 ÷ 30 МГц не превышает 6 МГц. Это же справедливо для измерений ночью, с той разницей, что существует небольшое количество, менее 10 %, реализаций флук-

туаций интенсивности, коррелированных в полосе частот, превышающей 6 МГц. Поскольку межпланетные мерцания коррелированы в диапазоне 20 ÷ 30 МГц [7], разница в ширине интервала частотной корреляции может быть использована как критерий разделения ионосферных и межпланетных мерцаний.

Отличие ширин полос частотной корреляции ионосферных и межпланетных мерцаний особенно наглядно может быть про-

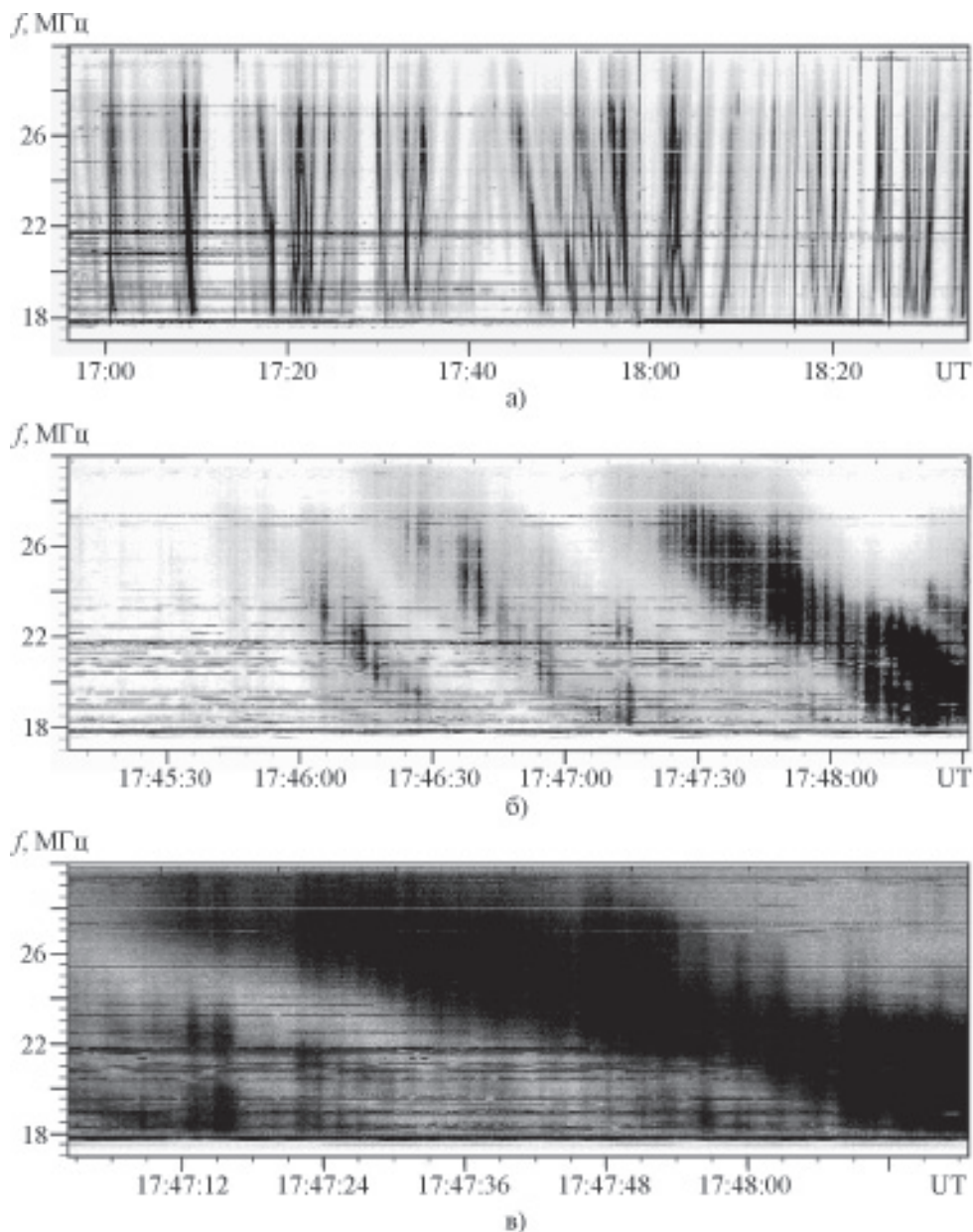


Рис. 5. Динамические спектры мерцаний радиоисточника 3C144 с разным временным разрешением: а) – 1 с, б) – 200 мс, в) – 20 мс

иллюстрировано при построении динамических спектров. На рис. 5, а-в показаны динамические спектры, полученные 7 февраля 2004 г. по наблюдениям мерцаний радиосточника 3C144 на радиотелескопе УТР-2. Видны флуктуации интенсивности сигнала (рис. 5, а), связанные с влиянием ионосферы с характерным периодом $1 \div 2$ мин и сильным частотным дрейфом. При большем временном разрешении, рис. 5, б и 5, в, на этой же записи обнаруживается тонкая структура, связанная с влиянием неоднородностей межпланетной среды и не имеющая частотного дрейфа в полосе частот $20 \div 30$ МГц.

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

Литература

1. Hay J. S., Parsons S. J., Phillips J. W. Fluctuations in cosmic radiation at radio-frequencies // *Nature*. – 1946. – Vol. 158. – P. 247-248.
2. Smith F. G., Little C. G., Lovell A. C. B. Origin of the fluctuations in the intensity of radio waves from galactic sources // *Nature*. – 1950. – Vol. 165. – P. 422-424.
3. Little C. G. Origin of the fluctuations on galactic radio noise // Ph. D. thesis, Univ. of Manchester. – 1952.
4. Жук. И. Н. Исследование угловой структуры космических источников методом мерцаний // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 1980. – Т. 23, №8. – С. 893-918.
5. Бовкун В. П., Жук И. Н. Спектр турбулентности и скорость солнечного ветра на элонгациях $90-150$ градусов // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 1982. – Т. 25, №7. – С. 727-733.
6. Бовкун В. П., Жук И. Н. Мерцания космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн на неоднородностях межпланетной плазмы и ионосферы // *Космическая наука и техника*. – 1992. – Вып. 7. – С. 80-91.
7. Фалькович И. С., Калинин 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.
8. Burrow K., Little C. G. An experimental investigation of the scintillation of radio stars // *Jodrell Bank Annals*. – 1952. – Vol. 1., No. 29. – P. 38-42.
9. Chivers H. J. A. The simultaneous observation of radio star scintillations on different radio-frequencies // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1960. – Vol. 17. – P. 181-187.
10. Ерухимов Л. М. О частотной корреляции флуктуаций радиоизлучения дискретных источников, вызванных неоднородностями ионосферы // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1964. – Т. 4, №1. – С. 75-82.
11. Ерухимов Л. М., Рыжов В. А. Исследование мелкомасштабной части спектра ионосферных неоднородностей радиоастрономическим методом на частотах $13-54$ МГц // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1968. – Т. 8, №4. – С. 657-664.
12. Антенны / А. В. Мень, Л. Г. Содин, Н. К. Шарыкин / Под ред. А. А. Пистолькораса. – М.: Связь, 1978. – Вып. 26. – 201 с.
13. Aarons J. 50 years of radio-scintillation observations // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 1997. – Vol. 39, No. 6. – P. 7-12.
14. Jokipii J. R. and Hollweg J. V. Interplanetary scintillation and the structure of solar wind fluctuations // *Astrophys J.* – 1970. – Vol. 160. – P. 745-753.

Частотна декореляція іоносферних мерехтінь радіоджерела Касіопея А в діапазоні $20 \div 30$ МГц

**І. С. Фалькович, О. О. Коноваленко,
М. М. Калініченко, І. М. Бубнов
А. Лекашо, Х. О. Рукер**

Надаються результати спостережень мерехтінь радіоджерела Касіопея А в діапазоні робочих частот $20 \div 30$ МГц. За аналізом експериментальних даних показано, що інтервал частотної кореляції іоносферних мерехтінь не перевищує 6 МГц для денних і нічних спостережень. Оскільки в цьому діапазоні міжпланетні мерехтіння компактних радіоджерел скорельовані, пропонується використовувати різницю між ширинами інтервалів частотної кореляції для розділення іоносферних та міжпланетних мерехтінь.

**The Frequency Decorrelation
of the Ionospheric Scintillations
of Cassiopeia A Radio Source
in the Range 20 ÷ 30 MHz**

**I. S. Falkovich, A. A. Konovalenko,
N. N. Kalinichenko, I. N. Bubnov,
A. Lecacheux, and H. O. Rucker**

The results of Cassiopeia A scintillation observations in the frequency range 20 ÷ 30 MHz are presented. The experimental data analysis has shown the correlation bandwidth of the ionospheric scintillations being no more than 6 MHz for the daytime and nighttime observations. As the interplanetary scintillations of the compact radio sources are correlated over this range, the difference in the correlation bandwidths is offered to be used for separating the interplanetary and ionospheric scintillations.