

**МЕТОД ИМПУЛЬСНОГО СТРОБИРОВАНИЯ
В РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
СО СВЕРХДЛИННЫМИ БАЗАМИ
ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ
ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ**

В. М. Городецкий

Рассмотрена возможность синтезирования широкой полосы методом стробирования для наблюдения медленно движущихся объектов при использовании стандартных методов обработки для РСДБ систем типа MARK-1. Показана возможность увеличения отношения сигнал / шум за счет выбора специальной импульсной функции. Рассмотрена конкретная схема для реализации метода в радиоинтерферометрии ИСЗ.

The new possibility of synthesizing the wide frequency band for the VLBI observation of slowly moving objects with the standard MARK-1 processing system using the impulse strobing method is described.

It is shown that the signal-to-noise ratio may be improved due to specific type of the impulse function. The original system of realization of these methods in the satellite VLBI observation is suggested.

Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ) в настоящее время не имеет конкурентов в радиоастрометрии, где уже достигнуты точности определения угловых координат источника $\sim 0.001''$.

Для реализации высокой точности угломерных измерений необходимо измерять с высокой точностью групповую задержку τ прихода фронта волны на пункты радиоинтерферометра. Эта точность тем выше, чем больше полоса принимаемых сигналов, и пропорциональна отношению сигнал/шум приемных устройств на пунктах интерферометра.

Увеличивать эффективную полосу сигнала можно различными методами синтеза — последовательным [1], параллельным [2]. В работах [3, 4] предлагается еще один метод синтеза — метод импульсного стробирования — для увеличения точности определения τ . Там же указывался метод обработки сигналов при таком синтезе, который является нетрадиционным для радиоинтерферометрии.

Для решения некоторых задач РСДБ метод обработки сигналов можно не менять. В частности, при наблюдении сильных радиоисточников (отношение сигнал/шум $\gg 1$) для обнаружения корреляционного отклика не требуется накопления сигнала: отклик виден по одному акту измерения. Поэтому метод синтеза широкой полосы методом импульсного стробирования [4] легко применить при наблюдениях искусственных спутников Земли (ИСЗ), где отношение сигнал/шум ≈ 100 . При этом, используя систему регистрации и обработки типа MARK-1 при полосе регистрации 250 кГц и полосе приема сигнала от ИСЗ 20 МГц, можно получить выигрыш по точности определения τ порядка 40—80.

Структурная схема двухэлементного интерферометра с синтезом полосы методом импульсного стробирования представлена на рис. 1.

Вывод функции корреляции двухэлементного интерферометра с синтезом широкой полосы методом стробирования был сделан в [4], при этом предполагалось, что функции $G(t)$ на обоих пунктах синхронны. Если учесть то обстоятельство, что функции $G(t)$ имеют временной сдвиг η , то коэффициент $R(\tau)$ интерферометра будет иметь вид

$$R(\tau) = \rho(\tau) r(\tau - \eta) \cos(\omega_0 \tau + \theta), \quad (1)$$

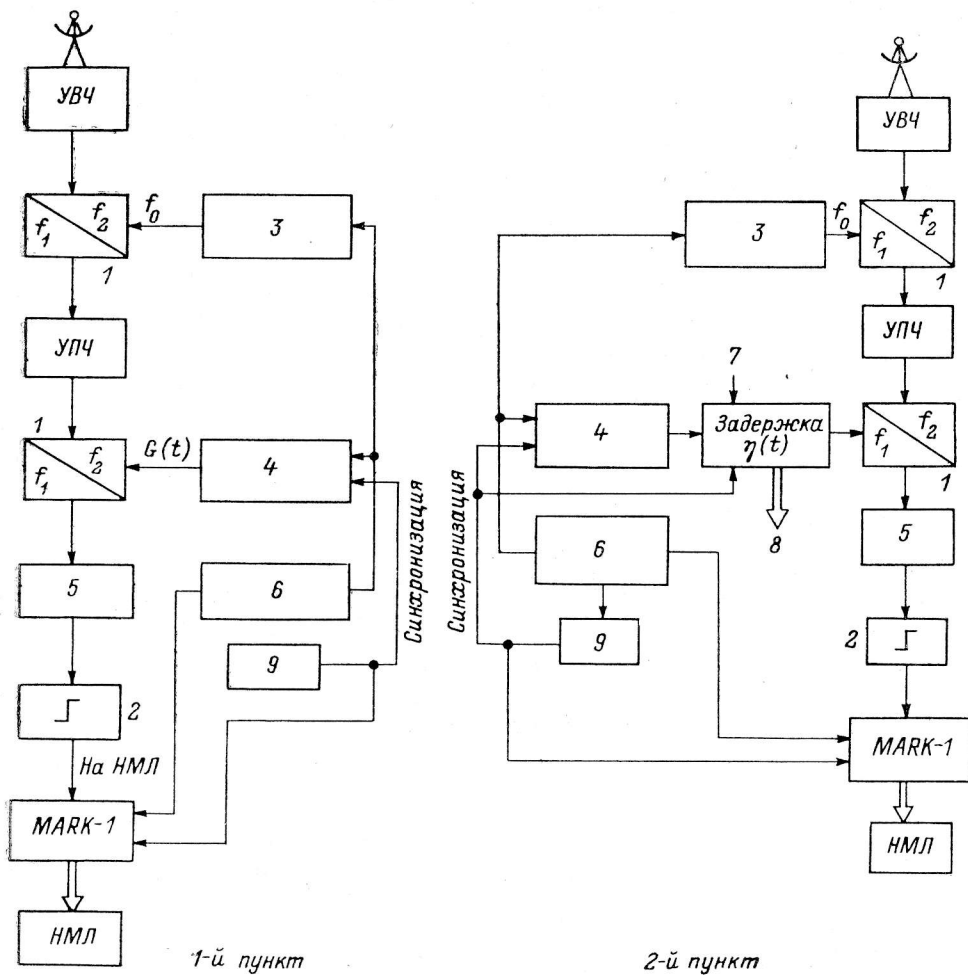


Рис. 1. Структурная схема двухэлементного интерферометра с синтезом широкой полосы методом импульсного стробирования.

УВЧ — усилитель высокой частоты; УПЧ — усилитель промежуточной частоты; НМЛ — накопитель на магнитной ленте; 1 — смеситель; 2 — ограничитель по нулевому уровню (клиппер); 3 — СВЧ-гетеродин; 4 — генератор $G(t)$; 5 — видеоусилитель; 6 — стандарт частоты; 7 — установка фиксированной задержки $G(t-n)$; 8 — текущий номер задержки; 9 — часы; $G(t)$ — периодическая импульсная функция.

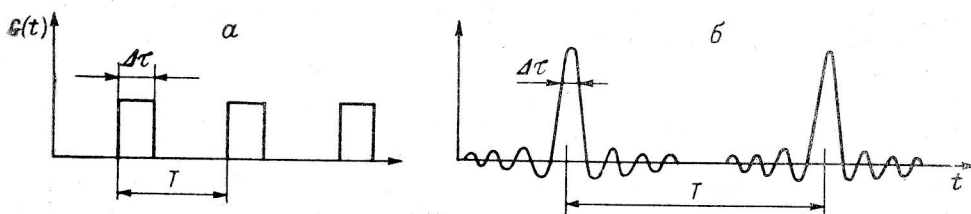


Рис. 2. Импульсные гетеродинные функции $G(t)$:

Импульсная последовательность: а — со скважностью $T/\Delta\tau$, б — $\prod_{m=1}^N \cos m\Delta\omega t$.

где

$$\rho(\tau) = A \sin \Delta\Omega(\tau - \tau_k) / |\Delta\Omega(\tau - \tau_k)| \quad (2)$$

— огибающая корреляционной функции, определяемая полосой регистрации сигнала,

$$r(\tau - \eta) = \sum_{n=-N}^N a_n^2 \exp[jn\Delta\Omega(\tau - \eta)] \quad (3)$$

— усеченная взаимокорреляционная функция $G(t)$ и $G(t - \eta)$ на двух пунктах (число членов ряда n ограничено);

$$a_n = \frac{2\Delta\Omega}{\pi} \int_{-\Delta\Omega/\pi}^{\Delta\Omega/\pi} G(t) \exp(-jn\Delta\Omega t) dt \quad (4)$$

— коэффициенты разложения функции $G(t)$ в ряд Фурье; τ — геометрическая задержка распространения фронта волны между пунктами, задержка распространения в атмосфере, задержка в аппаратуре, смещение шкал времени; τ_k — компенсационная задержка; η — временной сдвиг между функциями $G(t)$ на пунктах интерферометра; ω_0 — круговая час-

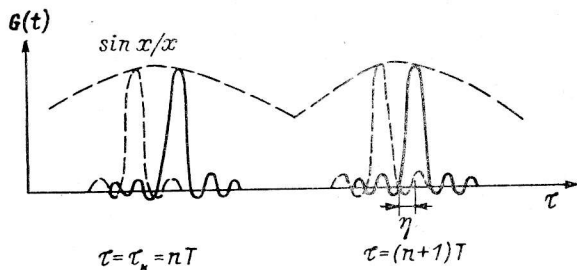


Рис. 3. Огибающая корреляционного отклика $R(\tau)$ двухэлементного интерферометра с синтезом полосы методом стробирования.

тота СВЧ-гетеродина; θ — разность фаз между СВЧ-гетеродинами на пунктах; $\Delta\Omega$ — полоса частот регистрации;

$$N = (\Delta\omega - \Delta\Omega) / \Delta\Omega;$$

$2\Delta\omega$ — полоса частот принимаемого сигнала (полоса синтеза).

Выбор функции $G(t)$, как видно из (1), определяет форму и ширину корреляционного отклика. Некоторые виды функций $G(t)$ рассматривались в [4] и показаны на рис. 2. На рис. 2, а показана функция

$$G(t) = \begin{cases} 1, & t \in [mT, mT + \Delta\tau]; \\ 0, & t \notin [mT, mT + \Delta\tau], \quad m \in Z; \end{cases}$$

на рис. 2, б — функция вида

$$G(t) = \prod_{m=1}^N \cos m\Delta\Omega t.$$

Из (1) видно, что если задержка η неопределенна и произвольна от наблюдения к наблюдению, то место появления корреляционного отклика становится неопределенным. На рис. 3 показана огибающая $R(\tau)$ без высокочастотного заполнения. Для того чтобы устранить неопределенность во времени появления корреляционного отклика, необходимо синхронизировать генераторы функций $G(t)$ на пунктах интерферометра от часов по минутной метке времени, которая одновременно является синхронизирующей и для комплекта регистрации. В этом случае величина η будет определяться только рассинхронизацией часов на пунктах, но так как эта величина уже учтена в задержке τ , то можно положить $\eta=0$. Исключение погрешности определения истинной геометрической задержки из-за неточной синхронизации часов, разности задержек прихода сигнала на пункты из-за неодинаковой электрической длины тропосферы, из-за неодинаковых аппаратурных задержек производится стандартными для РСДБ методами [5].

В случае наблюдения источников, движущихся относительно Земли, как естественных источников радиоизлучения, так и ИСЗ, отклик интерферометра

будет периодически появляться в интервале времени T , соответствующем тактовой частоте при условии, что $\tau = \tau_k = mT$ (мы выше оговаривали, что величина τ_k изменяется дискретно), так как $\tau = \tau(t)$.

При наблюдении геостационарных ИСЗ задержка τ меняется очень медленно. Наблюдения геостационарных ИСЗ в режиме РСДБ, проведенные в ГАО АН СССР, показали, что τ меняется примерно на 2 мкс за 1—2 ч наблюдений [6]. Поскольку в системе MARK-1 время наблюдения ограничено временем записи на НМЛ и составляет 3—4 мин, можно считать $\tau = \text{const}$ в течение времени наблюдения. Следовательно, может оказаться, что мы вообще не увидим отклика, так как функция $r(\tau)$ не зависит от τ_k и нет возможности провести точную компенсацию геометрической задержки с помощью τ_k .

Для наблюдения ИСЗ типа геостационарных или очень высоких, для которых можно считать $\tau = \text{const}$, целесообразно использовать следующую методику наблюдений. На одном из пунктов интерферометра сигнал от генератора функции $G(t)$ проходит через управляемую дискретную линию задержки (рис. 1). Дискрет по задержке выбирается равным $\pi/(2\Delta\omega)$, соответствующим половине полуширины корреляционного отклика. Задержка периодически пробегает значения от 0 до $2\pi/\Delta\omega$ с указанным дискретом. Код номера задержки поступает на регистрацию и записывается в качестве служебной информации на магнитную ленту, либо, если счетчик номера задержки запускается от импульса начала зоны, номер зоны определяет номер задержки автоматически. При обработке номер задержки дешифрируется.

Отклик интерферометра появится в момент времени, когда некомпенсированная часть задержки τ сравняется с $i\Delta\eta$, где i — номер задержки; $\Delta\eta = \pi/(2\Delta\omega)$ — дискрет изменения задержки η . Действительно, при условии «точной» компенсации $\tau = mT + \Delta$, где $|\Delta| \leq T$, и функция $r(\tau - \eta) = r(mT + \Delta - i\Delta\eta)$, так как $r(\tau)$ — функция периодическая с периодом T . Когда $i\Delta\eta \approx \Delta$, $r(\tau - \eta) \approx r(0)$ и достигает максимума. Вид функции $R(\tau)$ для указанного метода наблюдений показан на рис. 4, где $\{t_i\}$ — интервал времени, в течение которого i -я задержка η не меняется. Зная i , при котором $R(\tau)$ достигает максимума, мы можем вычислить задержку τ с точностью до полуширины функции $r(\tau)$, так как

$$\tau = mT + i\Delta\eta + |\varepsilon|, \text{ где } \varepsilon < \Delta\eta$$

Рассмотрим конкретный случай радиоинтерферометра для наблюдения геостационарных ИСЗ с типом регистрации MARK-1. Для такого интерферометра регистрируемая полоса видеосигнала составляет 0.25 МГц. Тактовая частота, определяющая дискрет компенсирующей задержки, равна 0.5 МГц (период $T = 2$ мкс). Полоса частот принимаемого от ИСЗ сигнала равна 20 МГц (сигнал квазিশумовой). Если в качестве $G(t)$ использовать периодическую последовательность коротких прямоугольных импульсов (рис. 2, а), то длительность импульса $\Delta\tau$ в этом случае равна 50 нс. Линия задержки обеспечивает для этого случая дискрет $\Delta\eta = 25$ нс. Период функции $G(t)$ равен $T = 2$ мкс.

Блок-схема генератора $G(t)$ и линии задержки η представлена на рис. 5. Сигнал от стандарта частоты 5 МГц ограничивается и поступает на дискретную линию задержки. Сигнал с отводов линии задержки (дискрет $\Delta\eta = 25$ нс) подается на коммутатор, который управляется либо счетчиком, либо импульсом начала зоны от комплекта регистрации MARK-1. Счетчик на 8 считает поступающие импульсы управления и подает сигнал на управляющие входы коммутатора. Таким образом, на выходе коммутатора присутствует сигнал с частотой 5 МГц, периодически сдвигаемый на 25 нс относительно опорного. Этот импульсный сигнал делится на 10, проходит дифференцирующую RC-цепочку, которая устанавливает длительность выходного импульса $\Delta\tau = 50$ нс, и через формирователь импульсов подается на перемножитель сигнала (смеситель).

В случае запуска счетчика от импульса начала зоны, в течение зоны задержка остается постоянной и номер зоны определяет величину задержки η . Номер зоны в системе MARK-1 четко фиксирован во времени — начало первой зоны соответствует моменту начала наблюдений и синхронизируется от часов пункта соответствующей минутной меткой. Зная номер зоны, мы можем точно определить величину задержки η появления корреляционного сигнала.

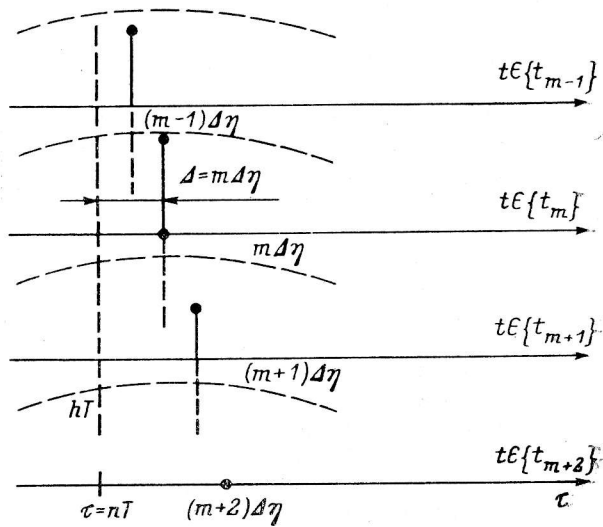


Рис. 4. Функция $R(\tau)$ в различные моменты времени t_m , соответствующие сдвигам линии задержки $m\Delta\eta$ при «точной» компенсации $\tau=nT$.

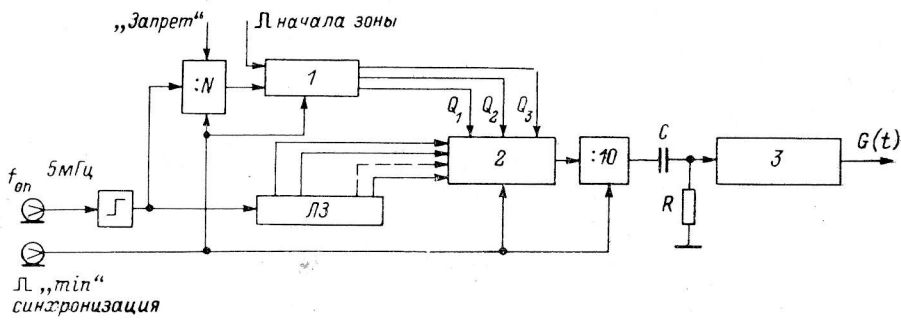


Рис. 5. Блок-схема генератора функции $G(t)$ с дискретной линией задержки ЛЗ. 1 — счетчик; 2 — коммутатор; 3 — формирователь.

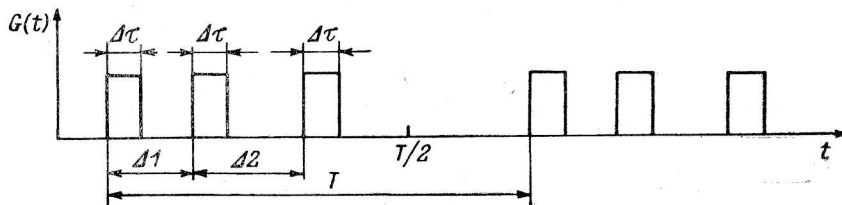


Рис. 6. Периодическая последовательность серии коротких импульсов $G(t)$, используемая для увеличения отношения сигнал/шум интерферометра.

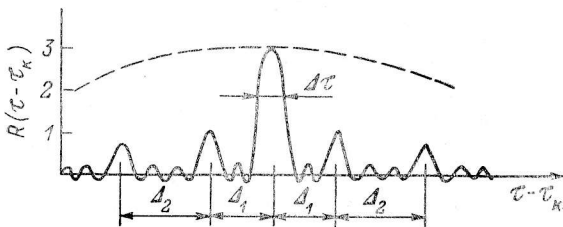


Рис. 7. Огибающая отклика $R(\tau)$ интерферометра для функции с тремя импульсами в серии.

Делители и счетчик также синхронизируются минутной меткой начала регистрации для обеспечения синхронизации генераторов функции $G(t)$ на пунктах интерферометра. Линия задержки устанавливается только на одном пункте интерферометра.

Для увеличения отношения сигнал/шум системы можно использовать в качестве функции $G(t)$ периодическую последовательность серии коротких импульсов (рис. 6). Увеличение отношения сигнал/шум достигается за счет увеличения числа импульсов в серии — это увеличивает реальное время наблюдения $\Delta t = l\Delta\tau$ за период следования T в l раз. Для устранения неоднозначности при определении положения максимума корреляционной функции при обработке расстояния Δj между импульсами в серии должны быть не кратными между собой и вся серия должна занимать промежуток меньший, чем $T/2$. Кроме того, расстояние Δj между импульсами должно быть больше, чем удвоенная ширина

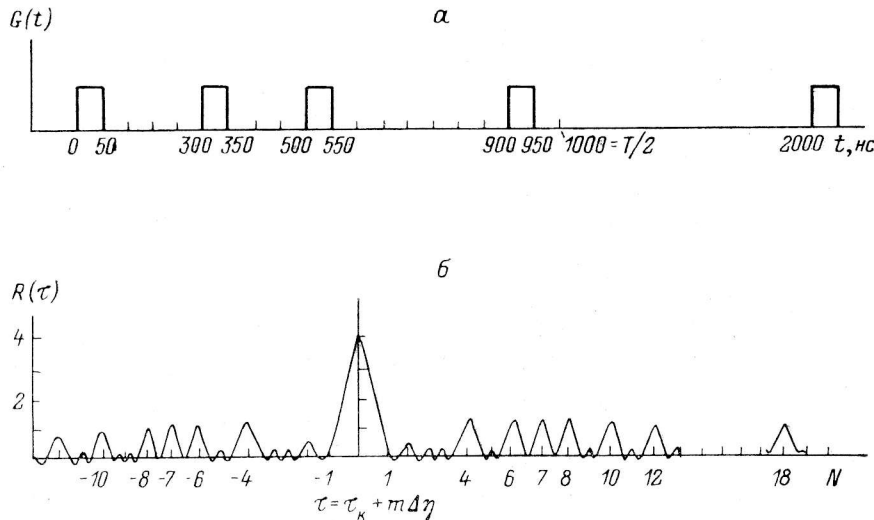


Рис. 8. Импульсная последовательность $G(t)$ (а) и огибающая отклика $R(\tau)$ для реально действующего интерферометра с регистрацией типа MARK-1 и синтезом полосы 20 МГц (б).
№ — номер сдвига.

одного импульса $\Delta\tau$, чтобы отклик $R(\tau)$ не размывался. И так, $\Delta j^k \geq 2\Delta\tau$, $\sum_{j=1}^k \Delta j < T/2$, где k — число импульсов в серии.

Отклик интерферометра $R(\tau)$ — огибающая — для такой $G(t)$ показан на рис. 7.

Для рассмотренного выше реально действующего интерферометра можно предложить функцию $G(t)$, представляющую собой серию из четырех импульсов; длительность каждого импульса равна 50 нс, и расстояния между импульсами равны 250, 150 и 350 нс (рис. 8, а). Вид огибающей $R(\tau)$ для такой функции $G(t)$ представлен на рис. 8, б.

Уровень боковых лепестков функции $R(\tau)$ в 4 раза меньше основного лепестка, и, учитывая большое отношение сигнал/шум, основной лепесток $R(\tau)$ легко обнаруживается при обработке.

Отношение сигнал/шум Q системы пропорционально $\sqrt{\Delta t \Delta F}$, где Δt — время наблюдения; ΔF — полоса регистрации:

$$Q \sim \sqrt{\Delta t \Delta F}.$$

Если обозначить Q_0 отношение сигнал/шум системы для $G(t)$ с одним импульсом в серии (рис. 2, а), то $Q = 2Q_0$. В работе [4] показано, что отношение сигнал/шум Q_0 для метода стробирования (один импульс) в серии длительностью $\Delta\tau$ и с периодом следования T практически совпадает с отношением сигнал/шум Q_n

обычного интерферометра без синтеза полосы при такой же полосе регистрации ΔF :

$$Q_0 \approx 0.7Q_0.$$

Следовательно, применение сложной импульсной функции $G(t)$ позволяет увеличить отношение сигнал/шум Q системы в 1.5—2 раза без увеличения аномальных ошибок обнаружения отклика 3, 4.

Выводы. В работе показана необходимость синхронизации генератора функции $G(t)$ на пунктах РСДБ, построенного по методу синтеза полосы со стробированием. Указана возможность применения метода для наблюдения медленно движущихся объектов (геостационарных ИСЗ) методами малой интерферометрии с регистрацией типа MARK-1 без изменения методики обработки наблюдений. Точность определения геометрической задержки τ увеличивается при этом в 40—80 раз по отношению к обычному интерферометру с регистрацией типа MARK-1.

Показана возможность увеличения отношения сигнал/шум системы в 1.5—2 раза с помощью применения в качестве функции $G(t)$ периодической серии импульсов.

Рассмотрена конкретная схема для реализации метода стробирования при наблюдении геостационарных ИСЗ с помощью РСДБ с применением дискретной управляемой линии задержки.

Литература

1. Гатэлюк Э. Д., Рябов О. А., Янкавцев М. В. Многофункциональная широкополосная система регистрации радиоинтерферометра независимого приема. // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. 19, № 11. С. 1724—1726.
2. Rogers A. E. E. Very long baseline interferometry with large effective bandwidth for phase-delay measurements // Radio Sci. 1970. 5, nr 10. P. 1239—1248.
3. Городецкий В. М., Дравских А. Ф., Фридман П. А. О синтезе широкой полосы в радиоинтерферометре со сверхдлинной базой // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. 24, № 6. С. 655—665.
4. Городецкий В. М. Импульсный метод синтеза широкой полосы в радиоинтерферометре со сверхдлинной базой // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1988. 27. С. 00.
5. Schilizzi R. I. A report on V. L. B. I. in Europe Internal Technical Report no 147. Radio Observatory, Dwingeloo the Netherlands, 1977.
6. Губанов В. С., Зимовский В. Ф., Умарбаева Н. Д. Экспериментальные РСДБ наблюдения ИСЗ-стационара на базе Пулково—Симеиз // Астрон. циркуляр. 1986.