

РАДІОАСТРОНОМІЯ І АСТРОФІЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra25.03.175>

УДК 520.272.2:
621.396.677.494

О. М. УЛЬЯНОВ¹, В. В. ЗАХАРЕНКО^{1,2}, Є. А. АЛЕКСЕЄВ^{1,2},
О. М. РЕЗНІЧЕНКО¹, І. О. КУЛАГІН¹, В. В. БУДНІКОВ¹,
В. І. ПРИСЯЖНИЙ³, А. В. ПОІХАЛО³, В. В. ВОЙТЮК³,
В. М. МАМАРСЬВ³, В. В. ОЖІНСЬКИЙ⁴, В. П. ВЛАСЕНКО⁴,
В. М. ЧМІЛЬ⁵, І. К. СУНДУЧКОВ⁵, М. М. БЕРДАР⁵,
В. І. ЛЕБІДЬ⁵, М. І. ПАЛАМАР⁶, А. В. ЧАЙКОВСЬКИЙ⁶,
Ю. В. ПАСТЕРНАК⁶, М. А. СТРЕМБИЦЬКИЙ⁶,
М. П. НАТАРОВ⁷, С. О. СТЕШЕНКО⁷, В. В. ГЛАМАЗДІН⁷,
О. І. ШУБНИЙ⁷, А. О. КИРИЛЕНКО⁷, Д. Ю. КУЛИК⁷

¹ Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна
E-mail: oulyanov@rian.kharkov.ua

² Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
E-mail: zakhar@rian.kharkov.ua

³ Національний центр управління та випробувань космічних засобів,
Державне космічне агентство України,
вул. Московська, 8, м. Київ, 01010, Україна
E-mail: ncuvkz@spacecenter.gov.ua

⁴ Центр космічних досліджень та зв'язку,
урочище “Під азимутом”, Сасівська сільська рада,
Золочівський р-н, Львівська обл., 80713, Україна

⁵ Приватне акціонерне товариство “Науково-виробниче підприємство “Сатурн”,
пр-т Леся Курбаса, 2-Б, м. Київ, 03148, Україна

⁶ Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна

⁷ Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України,
вул. Акад. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

СТВОРЕННЯ РАДІОТЕЛЕСКОПУ RT-32 НА БАЗІ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ MARK-4B. 3. ГЕТЕРОДИНИ ТА ВЛАСНІ ШУМИ ПРИЙМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Предмет і мета роботи: Дослідження з високою роздільною здатністю спектральних ліній космічних радіоджерел потребує низьких власних шумів приймальної системи радіотелескопу. Вони забезпечуються як вхідними криогенними підсилювачами, так і низькими фазовими шумами гетеродинів. Для виконання спектральних досліджень необхідно мати можливість перестроювання частот гетеродинів з малим частотним кроком. В роботі наведено результати розроблення синтезаторів частоти, які одночасно забезпечують як дуже малий частотний крок, та і низький рівень фазових шумів. Наведено також результати вимірювань власних шумів криогенних приймальних систем радіотелескопу RT-32. Методи і методологія: Приймальні системи RT-32 створені за схемами супергетеродинних приймачів з двома ступенями перетворення частоти. Настроювання приймальної системи з частотним кроком 10 або 20 МГц забезпечується гетеродинами першого перетворення частоти, а точне настроювання відбувається завдяки надвисокій роздільній здатності (0.0001 МГц) гетеродинів другого перетворення частоти, які створено на основі синтезаторів прямого цифрового синтезу.

Результати: Показано, що застосування синтезаторів прямого цифрового синтезу можливе лише з низькими значеннями коефіцієнтів множення частоти, а також за умов ретельної фільтрації усіх опорних сигналів. Вимірювання пара-

метрів гетеродинів проводилось за допомогою спектроаналізатора N9951A (Keysight Technologies), який має високу роздільну здатність та широкий динамічний діапазон. Для вимірювань шумових характеристик радіоприймальної системи радіотелескопу було виготовлено спеціальне узгоджене навантаження з можливістю охолодження до температури рідкого азоту. Вимірювання шумової температури було проведене в різних розрізах приймального тракту РТ-32. Співставлення таких вимірювань в різних конфігураціях дає можливість зробити попередню оцінку власних шумів РТ-32 в С та К діапазонах.

Висновок: Результати вимірювань власних шумів радіоприймальних систем та фазових шумів гетеродинів радіотелескопу РТ-32 показують, що радіотелескоп в С-діапазоні здатен виконувати високочутливі дослідження як в широкій смузі частот, так і у вузькій смузі частот з високою спектральною роздільною здатністю. В К-діапазоні власні шуми є співставними ($\approx 60 \div 80$ К) з зовнішніми шумами, що також дає можливість досліджувати випромінювання лазерних джерел.

Ключові слова: антена, власний шум, гетеродин, приймальна система, радіотелескоп, РТ-32, спектральні лінії

1. Вступ

Радіотелескоп РТ-32, який створюється [1, 2] на основі променеводної супутникової телекомунікаційної антени MARK-4В (розташована у Львівській області поблизу м. Золочів, належить Національному центру управління та випробувань космічних засобів – НЦУВКЗ), з лютого 2020 р. готовий до проведення тестових астрономічних спостережень в автономному режимі. На радіотелескопі встановлена приймальна та сервісна апаратура, включаючи криогенні вхідні підсилювачі С та К діапазонів, цезієвий стандарт частоти та сервер точного часу РТР-4100.

Аналогічні променеводні антенні системи трансформувались в радіотелескопи на початку 2000 рр. в Новій Зеландії та Японії [3, 4].

Як відомо, одним з актуальних завдань радіоастрономії є дослідження радіовипромінювання атомів і молекул в міжзоряному середовищі [5, 6]. Оскільки інтенсивність молекулярних ліній зростає пропорційно кубу частоти, нині більшість спостережень проводиться на досить високих частотах: вище 100 ГГц і аж до терагерцового діапазону. Водночас існує низка наукових задач, які можуть бути успішно вирішені на частотах нижче 25 ГГц [2]. Крім того, завдяки своїм властивостям радіотелескоп РТ-32 може застосовуватися для багаточастотних досліджень, тобто для одночасного спостереження в різних діапазонах частот. Незважаючи на можливість застосовувати цей радіотелескоп для вивчення широкосмугових джерел спорадичного та континуального радіовипромінювання, а також як один з пунктів радіоінтерферометричної мережі, нижче ми будемо обговорювати в основному можливість спектральних досліджень та вимірювання рівня чутливості апаратури РТ-32 для подібних спостережень.

З використанням радіотелескопа РТ-32 можна проводити спектральні дослідження [2]:

- вивчати радіолінії атомів водню та вуглецю,
- проводити багаточастотні дослідження ОН-мазерів,
- проводити багаточастотні дослідження метанольних CH_3OH -мазерів,
- проводити дослідження водних H_2O -мазерів,
- проводити дослідження молекулярних хмар в районах зореутворення в лінії амонію NH_4^+ та деякі інші.

Очевидно, що найперше радіотелескоп РТ-32 може бути застосованим для дослідження мазерних джерел (через їх досить високу яскравість). Отже, для вивчення спектральних ліній космічних мазерів та їх зеєманівського розщеплення в магнітних полях необхідно забезпечити спектральну роздільну здатність порядку одного кілогерца та навіть краще [2].

Крім того, для проведення спектральних вимірювань необхідно періодично здійснювати калібрування. Це потрібно для того, щоб поліпшити рівномірність підсилення приймачів та отримати пласку базову лінію. При калібруванні застосовується частотна модуляція з малою глибиною модуляції (ціле число каналів, але зі зсувом менше 1 МГц). Зазвичай така модуляція здійснюється переключенням частоти гетеродину, тому необхідно забезпечувати дуже точне настроювання частоти гетеродину та мінімізувати його фазові шуми.

До того ж за умов високої спектральної роздільної здатності на тривалі (багатогадинні) спостереження з накопиченням сигналу впливатиме доплерівський зсув, викликаний орбітальним та обертальним рухами Землі. Якщо такий вплив (протягом часу спостереження) призводить до спектрального зсуву спостережуваних ліній на

величину, більшу за напівширину частотної роздільної здатності, це спричинює зниження чутливості приладу. Тому, щоб зберегти мазерну лінію в межах одного елемента роздільної здатності аналізатора спектра, такий доплерівський зсув слід коригувати протягом усього часу спостереження. Найпростіший спосіб зробити таку корекцію – це точно настроювати частоту гетеродину супергетеродинного приймача. Мінімальний крок настроювання частоти має бути набагато меншим, ніж фактична роздільна здатність аналізатора спектра.

Слід зазначити, що наразі більшість радіоастрономічних приймачів побудовані відповідно до структури супергетеродинного приймача. Головна мета застосування супергетеродинних приймачів – це пригнічення дзеркальних каналів та перенесення спектра досліджуваного сигналу в діапазон досить низьких частот, де можна забезпечити комплексний аналіз таких сигналів.

Гетеродини є однією з важливих частин супергетеродинного приймача. Саме гетеродини забезпечують настроювання частоти приймачів. Наразі майже всі гетеродини радіоастрономічних приймачів будуються за схемами синтезаторів частоти. При центральних частотах досліджуваних сигналів С та К діапазонів ≈ 6 ГГц та ≈ 22 ГГц, частотах першого гетеродину ≈ 9 ГГц та ≈ 18 ГГц відповідно та роздільній здатності радіоастрономічного приймача-реєстратора (РІР) 1 кГц мінімальний частотний крок такого синтезатора має бути близько 0.1 кГц, що у відносних одиницях становить $3 \cdot 10^{-8}$ і навіть менше. Досягнення такого дрібного кроку перестроювання для синтезаторів з фазовим автопідстроюванням частоти є досить складним завданням.

Останніми роками з'явився новий вид синтезаторів [7] – синтезатори прямого цифрового синтезу (СПЦС, в англійській літературі – direct digital synthesizer, або скорочено DDS). Цей новий тип синтезаторів має низку істотних переваг порівняно з усіма відомими раніше типами. Але він має і характерні недоліки, які можуть позначитись на вузькосмугових вимірюваннях. Саме тому ми обговоримо спосіб застосування СПЦС як гетеродинів радіоастрономічних приймачів, які використано в РТ-32. Нижче будуть наведені тести самих гетеродинів, а також наведені вимірювання рівня чутливості радіотелескопу РТ-32 як цілого.

У другому розділі статті наведено структурну схему та основні параметри приймальної апаратури РТ-32, які визначають рівень шумів. Описані також перші гетеродини та схемні рішення, які дозволили використати СПЦС в конструкції других гетеродинів без втрати чутливості. В роботі обговорюються особливості вибору частот гетеродинів у процесі радіоастрономічних спостережень. У третьому розділі наведено результати вимірювання шумів як окремих гетеродинів, так і РТ-32 в цілому. В четвертому розділі надаються висновки та визначені перспективні напрямки вдосконалення РТ-32.

2. Приймальна система радіотелескопу РТ-32

2.1. Функціональна схема радіоприймальної системи РТ-32

Структура радіоприймальної системи обумовлена радіоастрономічними задачами, які планується вирішувати на РТ-32. Дослідження широкосмугових джерел континуального або імпульсного випромінювання потребують максимально розширювати діапазон робочих частот. Для цього використовуються широкосмугові приймачі зі смугою 1 ГГц як в С- так і в К-діапазоні. Для кожної поляризації сигналу застосовується по два незалежних канали приймача, що при відповідному виборі значень частот гетеродинів першого перетворення частоти дозволяє забезпечити одночасний аналіз смуги частот аж до 2 ГГц. Така смуга перекриває практично 100 % С-діапазону і до 40 % К-діапазону.

На чутливість радіоприймальної системи РТ-32 впливають переважно зовнішні шуми, втрати радіоприймальної системи, які існують до входів криогенних підсилювачів, вхідні кола криогенних підсилювачів та гетеродини. Спрощена блок-схема вхідних пристроїв та перетворювачів частот наведена на рис. 1.

Приймально-реєструвальні системи в діапазонах С та К створені однотипно. При їх проектуванні були враховані ті задачі, які планувалось вирішувати за допомогою РТ-32 [1, 2]. На входах криогенних підсилювачів включено спрямовані відгалужувачі сигналу, які поєднують сигнали “з неба” та сигнали калібрувального генератора шуму. Потім смуговий фільтр виділяє частоти

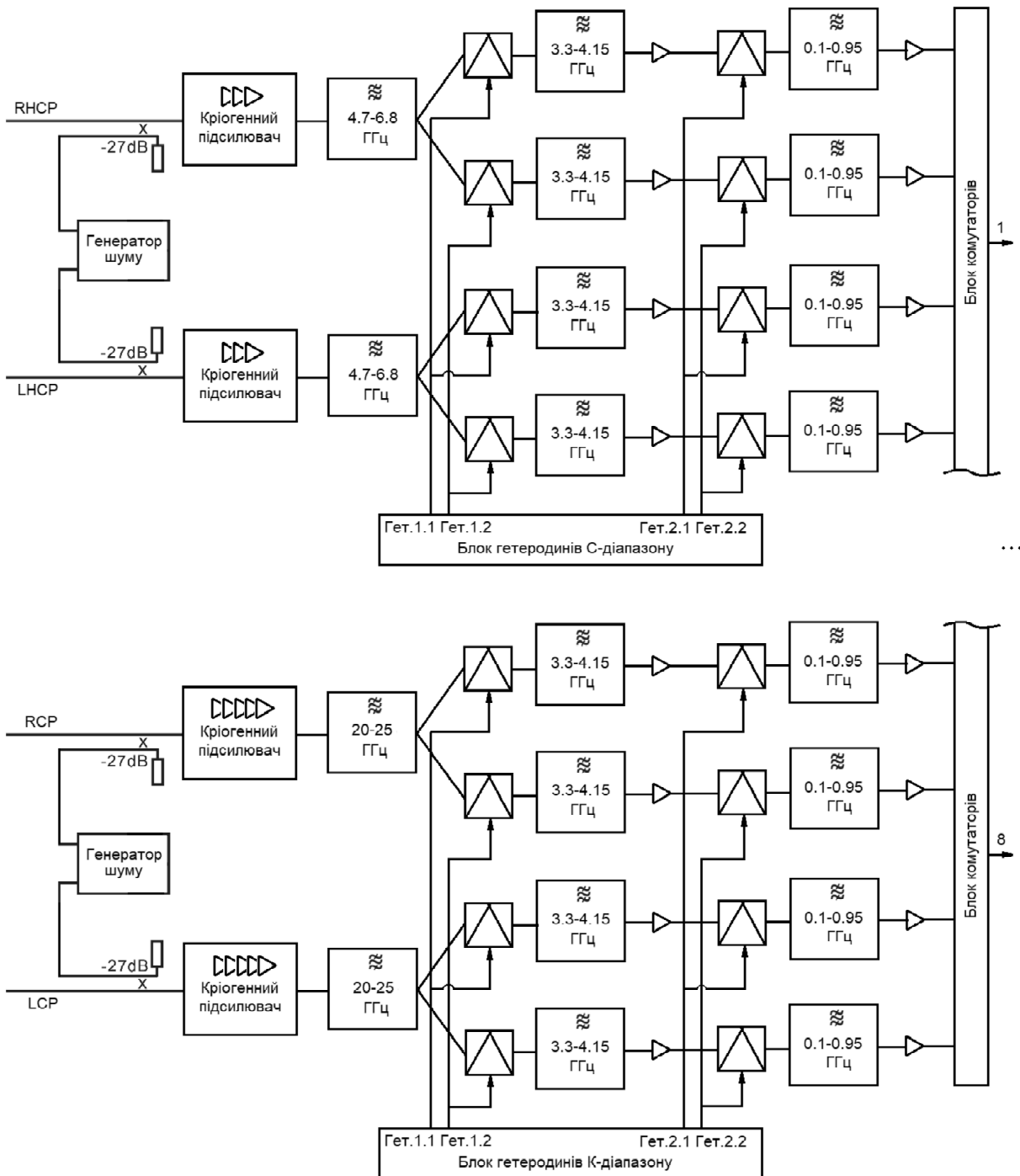


Рис. 1. Спрощена блок-схема радіоприймальної системи С та К діапазонів радіотелескопу РТ-32: спрямовані відгалужувачі сигналу калібрувального генератора шуму, смугові фільтри С (4.7 ÷ 6.8 ГГц) та К (20 ÷ 25 ГГц) діапазонів, підсилювачі з криогенним охолодженням, змішувачі першого перетворення, смугові фільтри 3.3 ÷ 4.15 ГГц, підсилювачі, змішувачі другого перетворення, смугові фільтри 0.1 ÷ 0.95 ГГц, підсилювачі, комутатор підключення потрібного виходу радіоприймальної системи до обраного каналу РПП. (RHCP/LHCP (right hand circular polarization, left hand circular polarization) – ортогональні лінійні поляризації; RCP/LCP (right circular polarization; left circular polarization) – права та ліва кругові поляризації)

С (4.7 ÷ 6.8 ГГц) та К (20 ÷ 25 ГГц) діапазонів. Після кожного фільтра сигнал розгалужується на два ідентичних канали з двоступеневим перетворенням частоти. В кожному з них є змішувач першого перетворення, смуговий фільтр зі смугою пропускання 3.3 ÷ 4.15 ГГц, підсилювач, змішувач другого перетворення, смуговий фільтр зі смугою пропускання 0.1 ÷ 0.95 ГГц, підсилювач. Спільний для всіх каналів комутатор дозволяє спрямувати потрібний сигнал на обраний вхід РПР. Розвивати приймально-реєструвальне обладнання планується поетапно. Згодом на РТ-32 планується використовувати 6 ÷ 8 двоканальних РПР. Зараз на цьому радіотелескопі в наявності тільки один приймач-реєстратор такого типу. Цього року заплановано сконструювати другий РПР. Детальний опис конструкції РПР не є темою цієї статті. Зазначимо лише, що загальні принципи конструкції подібних РПР викладені в [8].

Приймальну систему РТ-32 створено за схемою супергетеродину з двома ступенями перетворення частоти. При цьому грубе настроювання приймальної системи (з частотним кроком 10 або 20 МГц) забезпечується гетеродином першого перетворення частоти, а точне настроювання відбувається завдяки надвисокій роздільній здатності (0.0001 МГц) гетеродину другого перетворення частоти. Таке рішення дозволяє максимально спростити структуру гетеродинів першого перетворення частоти як С- так і К-діапазону та застосувати добре відомі синтезатори LMX2595 [9] виробництва Texas Instruments. Слід зазначити, що робочі частоти гетеродина К-діапазону мають сягати 21 ГГц, але значення максимальної робочої частоти для LMX2595 не перевищує 20 ГГц. Саме тому відмінність гетеродинів К-діапазону полягає в наявності додаткового модуля-помножувача частоти, який втілено на базі мікросхеми НМС814LC3В [10], з інтегрованим підсилювачем потужності надвисоких частот з низьким рівнем третьої та четвертої гармонік. Для кожного синтезатора виконувалось калібрування за рівнем вихідної потужності у всьому діапазоні робочих частот: +1 дБм у смузі 7.9 ÷ 10.2 ГГц з кроком перестроювання частоти 10 МГц для синтезатора-гетеродина С-діапазону та +10 дБм в смузі 16.6 ÷ 20.5 ГГц з кроком 20 МГц для синтезатора-гетеродина К-діапазону.

Забезпечення надвисокої роздільної здатності гетеродину другого перетворення частоти потребує застосування більш складної структури із використанням СПЦС, які дозволяють забезпечити надзвичайно дрібний крок перестроювання частоти [7]. Опис структури такого гетеродина буде наведено нижче в пп. 2.2 та 2.3.

2.2. Синтезатор прямого цифрового синтезу частоти як гетеродин для радіоастрономічного приймача

Однією з найбільш привабливих особливостей СПЦС є спроможність забезпечувати надзвичайно високу спектральну роздільну здатність (див., наприклад, [11]):

$$f_{DDS} = f_{REF} \frac{M}{2^N},$$

де f_{REF} – частота опорного сигналу СПЦС, M – умовний код частоти (ціле число, яке може приймати значення в діапазоні чисел від 1 до $2^N/2.5$), N – розрядність фазового акумулятора СПЦС (ціле число від 28 до 48, яке залежить від типу СПЦС).

Слід зазначити, що саме при застосуванні СПЦС дуже легко можна отримати мінімальний частотний крок Δf на мілігерцовому й навіть мікрогерцовому рівні [7]. Наприклад, для синтезатора на основі мікросхеми AD9913 мінімальний частотний крок при $f_{REF} = 250$ МГц становить $\Delta f \approx 0.0582$ Гц. Такі дрібні частотні кроки практично недоступні для синтезаторів з фазовим автопідстроюванням. Ось чому застосування СПЦС є майже ідеальним рішенням для систем з дуже точним настроюванням частоти. Разом з тим СПЦС мають як певні переваги так і недоліки.

- Основними перевагами СПЦС є наступні [7]:
- надзвичайно висока роздільна здатність (до 10^{-6} Гц);
 - дуже швидке перемикавання частоти (~ 10 нс);
 - перемикавання частоти з безперервною фазою;
 - можливість частотної модуляції, лінійної частотної модуляції тощо;
 - можливість фіксованого зсуву фази між різними синтезаторами.

Основними недоліками СПЦС є такі [7]:

- перш за все спектр вихідного сигналу СПЦС є дуже чутливим до якості опорного сигналу, однак слід зазначити, що синтезатори з фазовим

автопідстроюванням частоти (ФАПЧ) мають таку ж чутливість;

- наразі максимальна частота вихідного сигналу СПЦС не перевищує 1400 МГц [12], таким чином, отримати сигнали з більш високими частотами можна лише завдяки множенню частоти;

- наявність побічних компонент у спектрі вихідного сигналу гетеродина.

Наявність побічних компонент у вихідному спектрі СПЦС спричиняє принципові обмеження щодо застосування їх як джерела опорного сигналу для подальшого множення частоти з високим коефіцієнтом множення [13]. Для підвищення спектральної чистоти вихідного сигналу необхідно зменшувати коефіцієнт множення частоти, наскільки це можливо. Одним з найбільш прийнятних рішень для подолання цього обмеження є застосування перетворення з підвищенням частоти [14–16]. В англійській літературі таке перетворення називають “up-conversion”. Такий підхід дозволяє зменшити коефіцієнт множення, а також застосувати додаткові фільтри для фільтрації побічних компонент. Базуючись на результатах праць [14–16], ми вирішили побудувати гетеродин з дрібним частотним кроком на основі перетворювача з підвищенням частоти з використанням СПЦС.

2.3. Гетеродин радіоастрономічного приймача на основі перетворювача з підвищенням частоти

Запропонований гетеродин призначений для роботи на другому ступені перетворення частоти приймача радіотелескопа (діапазон частот гетеродина 3150 ÷ 3220 МГц). Грубе настроювання у широкій смузі частот здійснюється за допомогою гетеродина першого ступеня перетворення частоти. Другий ступень перетворення частоти призначений лише для проведення калібрування та корекції доплерівських зсувів. З цієї причини діапазон роботи даного гетеродина є досить вузьким, але крок настроювання частоти має бути дуже дрібним, аж до сотні герц.

Ми обрали згаданий вище СПЦС виробництва Analog Devices Inc. на основі мікросхеми AD9913. При значенні частоти опорного сигналу $f_{REF} = 250$ МГц він здатний генерувати сигнали в діапазоні частот до 100 МГц. З метою зменшення коефіцієнта множення частоти ми будемо так програмувати СПЦС, щоб вихідний гармонічний сигнал знаходився в діапазоні 65 ÷ 72 МГц з подальшим перетворенням його частоти до значень 315 ÷ 322 МГц і множенням з коефіцієнтом 10 за допомогою синтезатора з ФАПЧ.

Структурна схема запропонованого гетеродина показана на рис. 2. Як вже згадувалось, СПЦС є дуже чутливим до якості опорного сигналу. Саме тому опорний сигнал з частотою 10 МГц фільтрується вузькосмуговим кварцовим фільтром зі смугою частот близько 1 кГц (див. рис. 2). Потім цей відфільтрований сигнал використовується синтезатором з ФАПЧ (ADF4111 з зовнішнім генератором, керованим напругою) для отримання опорного сигналу як для СПЦС, $f_{REF} = 250$ МГц, так і для перетворювача з підвищенням частоти. Для мінімізації впливу гармонік високого порядку на перетворювач частоти сигнал з частотою 250 МГц додатково фільтрується смуговим фільтром (див. рис. 2), який вносить затухання близько 40 дБ на частоті 500 МГц.

Ми сконструювали перетворювач частоти на основі мікросхеми AD8343 [17]. Після перетворення частоти потрібна смуга частот, 315 ÷ 322 МГц, виділяється смуговим фільтром з центральною частотою 320 МГц (смуга пропускання близько 50 МГц) та підсилюється до необхідного рівня. Множення частоти з коефіцієнтом 10 забезпечується синтезатором з ФАПЧ ADF4351 [18] (мікросхема цього синтезатора містить внутрішній генератор, який керується напругою). Сигнал

Після перетворення частоти потрібна смуга частот, 315 ÷ 322 МГц, виділяється смуговим фільтром з центральною частотою 320 МГц (смуга пропускання близько 50 МГц) та підсилюється до необхідного рівня. Множення частоти з коефіцієнтом 10 забезпечується синтезатором з ФАПЧ ADF4351 [18] (мікросхема цього синтезатора містить внутрішній генератор, який керується напругою). Сигнал

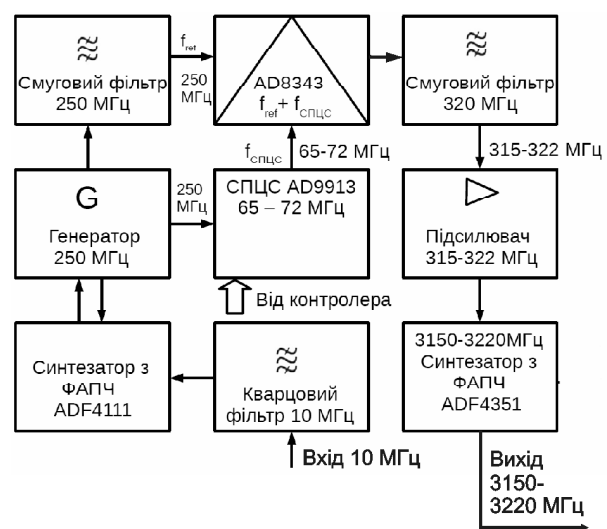


Рис. 2. Функціональна схема гетеродина другого перетворення частоти на основі СПЦС (діапазон частот 3150 ÷ 3220 МГц)

з частотою $315 \div 322$ МГц подається як опорний сигнал на ADF4351. Слід зазначити, що згідно технічним даним синтезатор на основі мікросхеми ADF4351 має працювати з опорним сигналом з частотою нижче 250 МГц. Однак наші численні тести показали, що він ефективно може застосовуватися й на частотах $315 \div 322$ МГц.

Значення вихідної частоти гетеродина керується від комп'ютера через спеціальний контролер, який побудований на мікроконверторі ADuC848 [19]. Зв'язок між комп'ютером та контролером забезпечується за допомогою стандартного інтерфейсу RS-232 (для спрощення схеми на рис. 2 елементи керування не показані).

Оскільки роздільна здатність аналізатора спектра радіотелескопа у режимі реєстрації з високою роздільною здатністю становить 1 кГц, ми програмно обмежили мінімальний частотний крок гетеродина значенням $\Delta f = 100$ Гц (фактично мінімальне доступне значення частотного кроку становить $\Delta f \approx 0.582$ Гц).

2.4. Система дистанційного керування гетеродинами радіотелескопа РТ-32

Систему дистанційного керування забезпечує спеціалізований контролер, який побудовано на основі мікроконвертора ADuC848 [19]. Загальну функціональну схему блока гетеродинів з дистанційним керуванням показано на рис. 3. На схемі надписами “Гет. 1.1” та “Гет. 1.2” позначені гетеродини першого перетворення частоти, які вико-

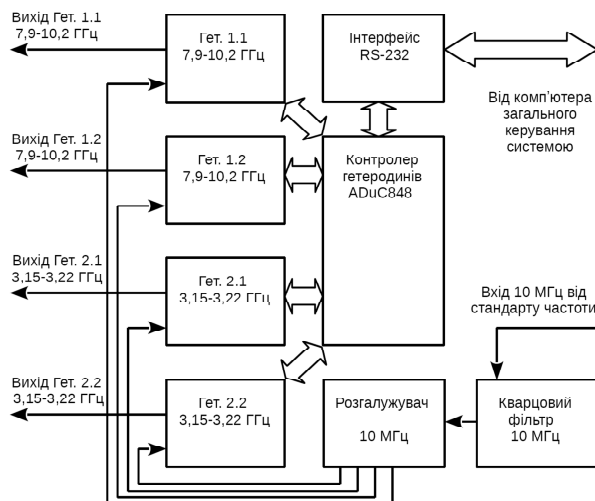


Рис. 3. Функціональна схема блоку гетеродинів С-діапазону з дистанційним керуванням

нані на основі мікросхеми LMX2595. Гетеродини другого перетворення частоти позначено як “Гет. 2.1” та “Гет. 2.2”. Для отримання високої чистоти спектра вихідних сигналів опорний сигнал з частотою 10 МГц фільтрується вузькосмуговим кварцовим фільтром (див. рис. 3).

Зв'язок контролера з комп'ютером загального керування системою здійснюється за допомогою послідовного інтерфейсу RS-232. Для керування гетеродинами ми реалізували “user friendly interface” – дружній до користувача інтерфейс, в якому команди керування мають інтуїтивно зрозумілий вигляд та передаються у текстовому вигляді. Програмне забезпечення контролера передбачає дистанційне керування значеннями частот гетеродинів, рівнем потужності гетеродинів, а також забезпечує оперативний контроль працездатності системи.

2.5. Вибір частот гетеродинів для різних режимів роботи радіоприймальної системи

Наявність двох ідентичних каналів після малошумлячого підсилювача дозволяє розширити набір режимів спостережень. РІР, розроблений для РТ-32, має наступні режими роботи:

- режим реєстрації широкої смуги $0 \div 1000$ МГц (ширина спектрального каналу 61 кГц, за рахунок неідеальності фільтрів радіоприймальної системи вихідна смуга дорівнює $100 \div 950$ МГц);
- режим реєстрації з високою роздільною здатністю (200 ± 7.8125) МГц (ширина одного спектрального каналу дорівнює 0.954 кГц).

Вибір значень частот гетеродинів C та K діапазонів першого та другого перетворення (F_{gem1C} , F_{gem2C} , F_{gem1K} , F_{gem2K} відповідно) здійснюється таким чином.

Діапазон C (смуга частот “в небі” $4.7 \div 6.8$ ГГц). Номінальне значення інтервалу перестроювання першого гетеродина становить $7.9 \div 10.2$ ГГц (частота першого гетеродина вища частоти вхідного сигналу). Вибір значення частоти гетеродина вище частотного діапазону сигналів, що приймаються, унеможливує потрапляння його гармонік в діапазон частот, який підлягає аналізу. За рахунок неідеальності фільтрів смуга частот після першого перетворення частоти становить $3.3 \div 4.15$ ГГц (в ідеальному випадку $3.2 \div 4.2$ ГГц).

Формула розрахунку частоти першого гетеродина,

$$F_{зем1C} - F_{НЕБО} = F_{зем2C} + F_{РПР}, \quad (1)$$

при заданій частоті “в небі”, $F_{НЕБО}$, та частоті другого гетеродина, $F_{зем2C} \approx 3.2$ ГГц, дозволяє перетворити досліджувану частоту “в небі” в обрану частоту РПР. Наприклад, при виборі $F_{НЕБО} = 6.8$ ГГц і $F_{РПР} = 0.1$ ГГц (нижня границя робочого діапазону частот в режимі широкої смуги) $F_{зем1C}$ дорівнює $6.8 + 3.2 + 0.1 = 10.1$ ГГц. При $F_{НЕБО} = 4.7$ ГГц і $F_{РПР} = 0.95$ ГГц частота першого гетеродина $F_{зем1C} = 8.85$ ГГц.

Через те, що крок перестроювання першого гетеродина є досить великим (10 МГц у С-діапазоні і 20 МГц у К-діапазоні), для “тонкого” настроювання на частоту “в небі” у режимі реєстрації з високою роздільною здатністю використовується перестроювання другого гетеродина в межах $3.150 \div 3.220$ ГГц.

Діапазон К (смуга частот “в небі” $20 \div 25$ ГГц). Діапазон перестроювання першого гетеродина $F_{зем1K} = 16.6 \div 20.95$ ГГц. В К-діапазоні значення частоти гетеродина першого перетворення частоти встановлюється нижче частотного діапазону сигналів, що приймаються ($F_{НЕБО}$), оскільки ні за якого значення частоти гетеродина друга гармоніка не потрапляє в смугу аналізу, а виготовлення гетеродина на частоти вище 28 ГГц пов’язане з вищою вартістю та більшими технічними труднощами. Частота $F_{зем1K}$ у цьому випадку дорівнює

$$F_{зем1K} = F_{НЕБО} - F_{зем2K} - F_{РПР}. \quad (2)$$

Як вже згадувалося в п. 2.1, наявність дублювання приймального тракту дозволяє подвоювати смугу спостережень. За рахунок вибору значень частот перших гетеродинів зі зсувом на 1 ГГц (Гет1.1 – 10.1 ГГц та Гет1.2 – 9.1 ГГц, рис. 4) смуга спостережень практично дорівнює всьому С-діапазону радіотелескопа РТ-32. В режимі з високою роздільною здатністю можна обирати різні спектральні лінії, наприклад, метанольні та гидроксильні, та спостерігати їх одночасно.

Наявність крос-кореляційної обробки в РПР дозволяє отримати деякі нестандартні режими. Надширокопasmуговий синтезатор LMX2595 дозволяє формувати частоти першого гетеродина С-діапазону в смузі $1.2 \div 3.3$ ГГц, тобто так, що

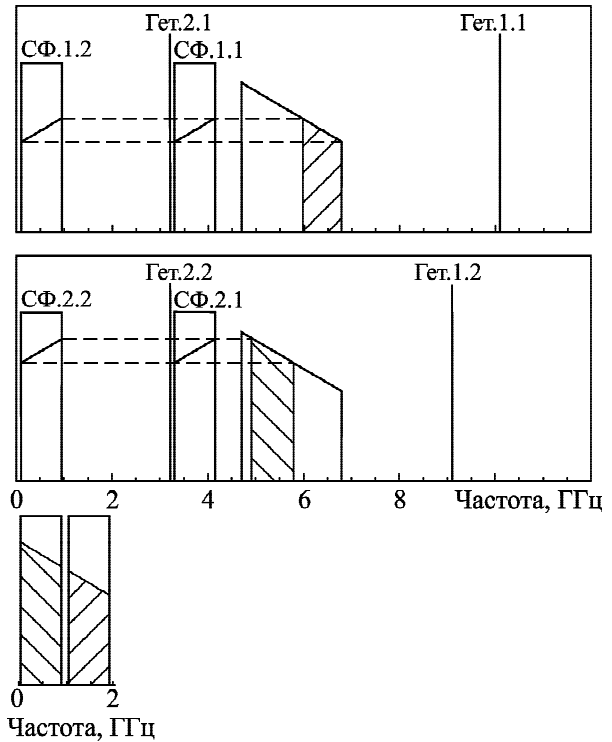


Рис. 4. Ілюстрація можливості формування смуги спостережень 2 ГГц за допомогою смугових фільтрів (СФ1.1, СФ1.2, СФ2.1, СФ2.2), наявного дублювання приймального тракту та зсуву частоти першого гетеродина на 1 ГГц до низу. На нижній панелі наведена суцільна смуга частот “в небі”, яка може бути отримана після комп’ютерної обробки зареєстрованих сигналів

частоти “в небі” можуть бути розташовані вище частот першого гетеродина, аналогічно тому, як це зроблено в діапазоні К (рис. 5). Таке розташування менш вдале, ніж обране для радіоприймальної системи, оскільки є небезпека просочування сигналів другої та третьої гармонік першого гетеродина до вхідних модулів РТ-32 та блоків першої проміжної частоти (рис. 6).

Однак для багатьох частот, де існують спектральні лінії астрономічних джерел, гармоніки першого гетеродина не є завадами. Тоді в двох каналах однієї поляризації можна отримати той самий частотний діапазон як в прямому, так і в інверсному спектрі (рис. 6). На верхній панелі рис. 6 схематично наведено “стандартне” інверсне перетворення частот “в небі”, близько 6.03 ГГц, у смугу з високою роздільною здатністю, (200 ± 7.8125) МГц, (позначено чорним ромбом на характеристиці фільтра). На нижній панелі наведено перетворення тих самих частот у смугу з високою роздільною здатністю за до-

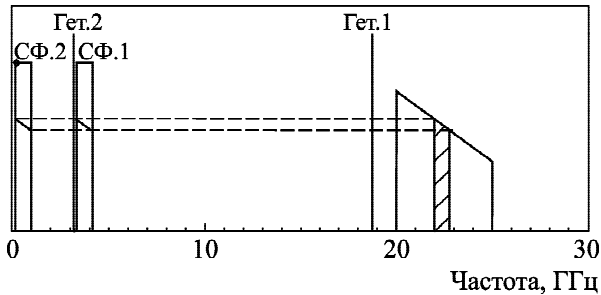


Рис. 5. Спектральне положення досліджуваної смуги в К-діапазоні, смуги фільтрів першої та другої проміжних частот та розстановка частот гетеродинів в К-діапазоні

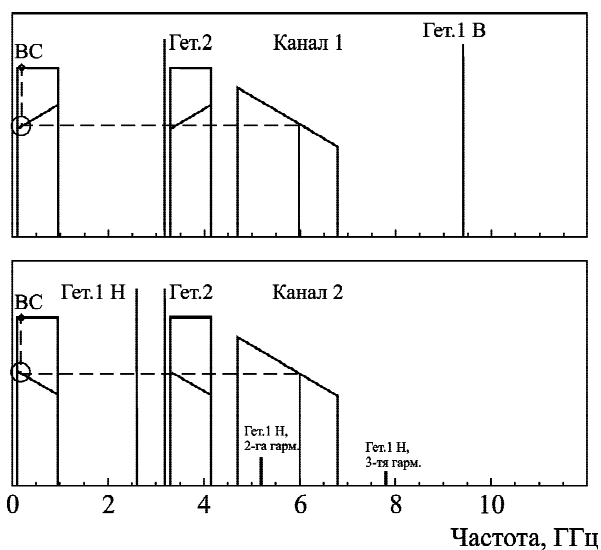


Рис. 6. Ілюстрація можливості прийому тієї самої частоти в режимі вузької смуги (ВС) при встановленні частот гетеродинів першого перетворення (Гет.1) вище (В) та нижче (Н) ресструємої смуги частот

помогою прямого перетворення згідно з формулою (2) (значення частоти першого гетеродина дорівнює 2.63 ГГц).

Розглянемо різні варіанти співвідношення власних шумів каналів прийому та сигналу. Якщо вважати, що шуми, які виникають в каналах прийому, є незалежними, то додавання цих сигналів дає змогу підняти чутливість у $\sqrt{2}$ рази, що проілюстровано на рис. 7. На рис. 7, а показано модель гаусового сигналу (аналог спектральної лінії космічного джерела) з інтенсивністю, яка дорівнює трьом середньоквадратичним відхиленням відносно доданого шуму. Фільтр низьких частот дозволяє зменшити інтенсивність шуму (рис. 7, б). При додаванні спектрів двох каналів (рис. 7, в) та низькочастотної фільтрації (рис. 7, г) отримаємо

вказане вище підвищення чутливості. Ще більший вигаш можна отримати, використовуючи кореляційну обробку “прямого” та “інверсного” сигналів. На рис. 8, а продемонстровано автоспектр сигналу, аналогічного тому, що наведений на рис. 7, а. Результат його фільтрації показаний на рис. 8, б. Фільтрований крос-спектр, якщо вважати шум в одному каналі ідентичним іншому (підвищення чутливості у $\sqrt{2}$ рази), та крос-спектр з незалежними шумами в обох каналах наведено на рис. 8, в та на рис. 8, г відповідно. Після фільтрації в останньому випадку отримаємо вигаш у 2 рази.

Існує ще одне застосування крос-кореляційної обробки сигналів. Для аналізу ступеню поляризаційної розв'язки сигналу слід аналізувати крос-кореляцію сигналів обох ортогональних поляризацій, що дозволить відокремити паразитний сигнал апаратної або наведеної поляризації. У цьому разі шуми належатимуть різним вхідним підсилювачам. Наявність дублювання каналів та можливість перестроювання як першого, так і другого гетеродинів дозволяють обрати сигнали гетеродинів, які матимуть різні “вражені” точки та різні фазові шуми. Якщо обрати значення других гетеродинів F_{zem2C1} та F_{zem2C2} для першого і другого каналів (див. рис. 1) відповідно 3.2 та 3.15 ГГц, а значення перших гетеродинів F_{zem1C1} F_{zem1C2} (згідно з (1)) – 10.2 та 10.15 ГГц, то “вражені” частоти гетеродинів будуть різними при тому самому діапазоні частот “в небі”.

Наявність подвійного комплексу гетеродинів можна використовувати також для калібрування та перевірки тракту радіотелескопа.

2.6. Керування частотами других гетеродинів С та К діапазонів

Керування частотами других гетеродинів необхідно ще в двох випадках. Перший і основний – модуляція частоти у спостереженнях спектральних ліній для калібрування і компенсації малих трендів (нахилів) базової лінії поблизу досліджуваних спектральних ліній (використовується в режимі ресстрації з високою роздільною здатністю РПР). Значення зсуву та часовий інтервал модуляції залежать від декількох параметрів. Їх розрахунок описаний в роботі [2]. Діапазон значень частотного зсуву – від декількох кілогерц до декількох десятків кілогерц, період модуляції – від декількох секунд

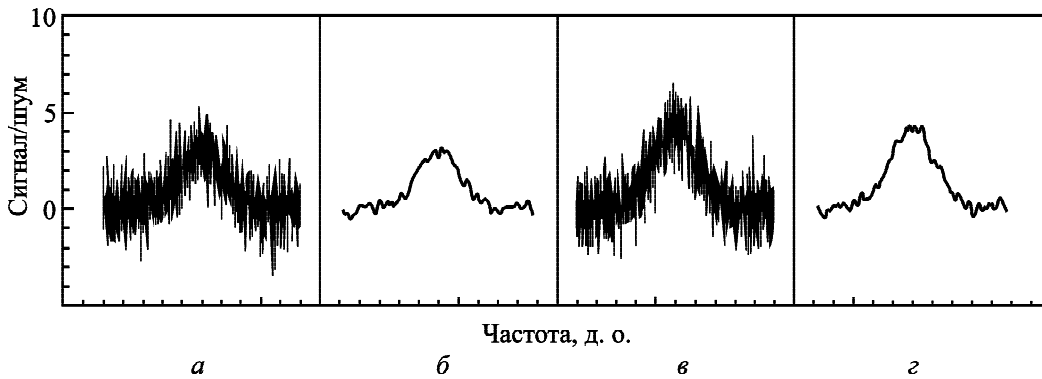


Рис. 7. Симуляція підвищення чутливості приймальної системи у $\sqrt{2}$ раза при додаванні сигналів двох каналів за умови незалежності шумів: *а* – модель гаусового сигналу з інтенсивністю, яка дорівнює трьом середньоквадратичним відхиленням відносно шуму; *б* – фільтрований сигнал *а*; *в* – результат складання спектрів двох каналів; *г* – результат фільтрації сигналу *в*

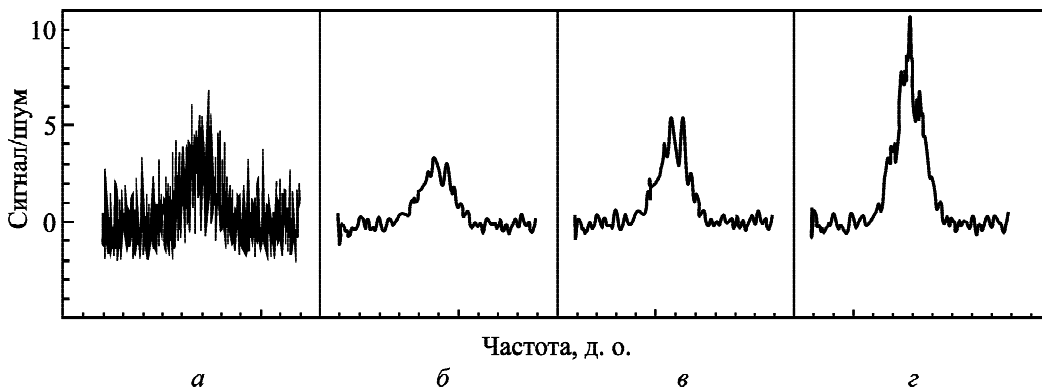


Рис. 8. Симуляція крос-кореляційної обробки сигналів двох каналів: *а* – автоспектр сигналу, аналогічного показаному на рис. 7, *б* – результат фільтрації цього сигналу; *в* – відфільтрований крос-спектр, якщо вважати шум в одному каналі ідентичним іншому (значення частот перших гетеродинів в обох каналах обираються однаково – вище смуги частот прийому), очікується підвищення чутливості у $\sqrt{2}$ раза; *г* – крос-спектр з незалежними шумами в обох каналах після фільтрації (в одному каналі значення частоти першого гетеродина встановлюється вище смуги прийому, а в другому – нижче), очікується вигравш у 2 рази

до декількох десятків секунд. Важливо відзначити, що разом з частотною модуляцією зазвичай вмикається/вимикається і шумовий калібрувальний генератор в тракці прийому (див. рис. 1). Таким чином, і в діапазоні С, і в діапазоні К переключення значень частоти других гетеродинів буде прив'язане до розкладу спостережень.

Інший випадок використання тонкого настроювання других гетеродинів – це компенсація добового та річного руху Землі, що широко використовується під час спостережень і обробки даних. Для більшості завдань є зручним постпроцес компенсації: введення поправок під час обробки даних після запису. Але у разі тривалого накопичення даних (для досягнення максимальної чут-

ливості) і у разі можливого зсуву в кількох частотних каналах доцільно використовувати наявну можливість тонкого налаштування частот другого гетеродину. Розрахунок компенсації руху Землі широко описаний в літературі. Існують відповідні комп'ютерні програми, вбудовані в такі пакети, як Matlab. Точні значення зсуву частоти розраховуватимуться для конкретних спостережень та конкретного радіотелескопа.

Інтервал підстроювання (для К-діапазону підстроювання здійснюється приблизно в 5 разів частіше, ніж для С-діапазону) в середньому становитиме десятки хвилин. Використовуватися такий режим буде у дослідженні найбільш слабких спектральних ліній.

3. Результати вимірювання шумів гетеродинів та радіоприймальної системи в цілому

3.1. Дослідження рівня фазових шумів гетеродинів С та К діапазонів

Дослідження вихідного спектра гетеродинів виконувалися за допомогою мікрохвильового аналізатора спектра N9951A виробництва компанії Keysight Technologies з використанням однієї бічної смуги, з відстроюванням за частотою на 1, 10, 100 кГц і 1 МГц. Записи спектрів з різною спектральною роздільною здатністю показані на рис. 9. Слід зазначити, що частотний діапазон гетеродина досить вузький ($3150 \div 3220$ МГц), тому зміни спектральної чистоти в цьому діапазоні є незначними. В табл. 1 наведені результати вимірювань фазових шумів перших гетеродинів.

Як було показано в роботі [2], рівень фазових шумів, який потрібно забезпечити для радіоастрономічних досліджень на РТ-32, не повинен перевищувати -55 дБн/Гц. Стосовно К-діапазону, в якому відносна ширина спостережуваних спектральних ліній буде в декілька разів більша ніж в С-діапазоні, припустимо було б погіршення фазових шумів гетеродинів ще на $5 \div 7$ дБ. Тож в обох діапазонах забезпечено значний запас по цьому параметру.

На рис. 9, в позначені смуги пропускання застосованих систем ФАПЧ. Цей параметр для обох систем становить приблизно 50 кГц. Оскільки частота синтезатора (ADF4111) 250 МГц після перетворення з підвищенням частоти множиться на коефіцієнт 10, значення, яке спостерігається, слід ділити на 10. Результати вимірювань рівня фазового шуму запропонованого гетеродина наведені в табл. 2. Отриманий рівень фазового шуму є прийнятним для цього типу гетеродинів.

3.2. Оцінка температури власних шумів криогенного приймача С та К діапазонів

Після створення криогенного приймача постала задача дослідження впливу власних шумів на приймальний тракт РТ-32. Для цього на першому етапі потрібно було оцінити еквівалентну температуру власних шумів у С та К діапазонах на фланцях криогенного приймача. Найбільш придатним для такої оцінки виявився режим спектроаналізатора. На момент оцінки власних шумів криогенного прий-

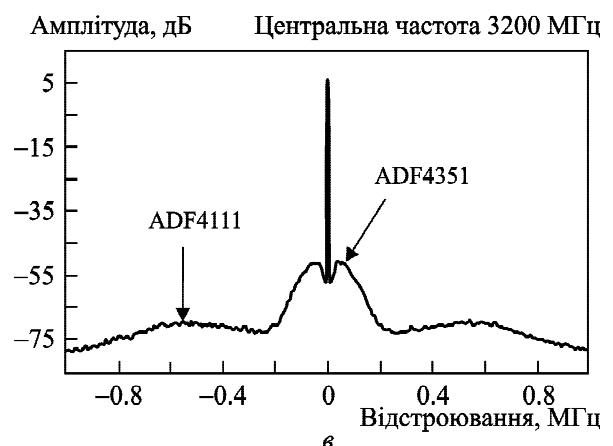
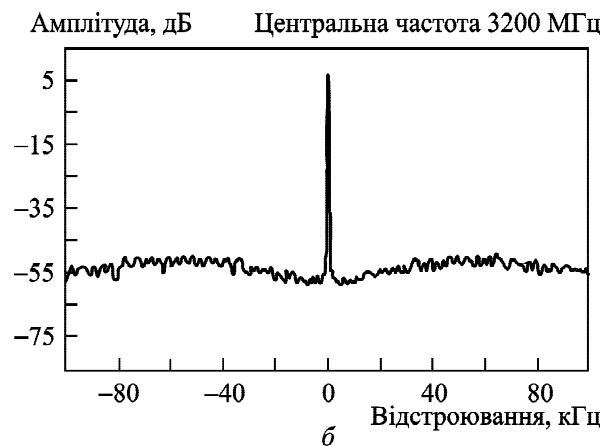
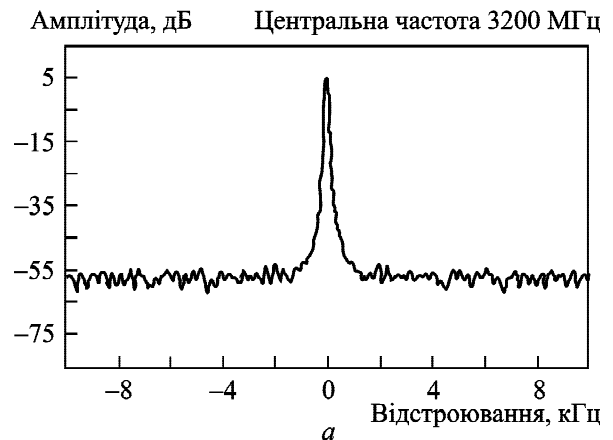


Рис. 9. Спектри вихідного сигналу гетеродина в смузі частот $3150 \div 3220$ МГц за різної спектральної роздільної здатності

мача в нашому розпорядженні був лише одноканальний спектроаналізатор послідовного типу SSA3021X виробництва Siglent Technologies. Його використання дозволяло проводити вимірювання лише в одному каналі реєстрації. В цьому ж ка-

Таблиця 1. Результати вимірювань фазових шумів перших гетеродинів С та К діапазонів

Відстроювання, кГц	Фазовий шум гетеродина С-діапазону, дБн/Гц	Фазовий шум гетеродина К-діапазону, дБн/Гц
1	-72	-60
10	-72	-70
100	-91	-82
1000	-95	-90

Таблиця 2. Виміряні значення рівня фазових шумів других гетеродинів

Відстроювання, кГц	Рівень фазових шумів, дБн/Гц
1	-77
10	-82
100	-79
1000	-97

налі оцінювалась чутливість всієї приймальної системи РТ-32.

Для оцінки власної шумової температури ми використовували так званий “У”-метод [1, 2], коли фізична температура навантаження змінювалась від 292 К до 80 ÷ 85 К. Тобто в заданому розрізі системи реєстрації формувалась температурна сходинка, загальний вигляд якої наведено на рис. 10. Оцінюючи температури власних шумів криогенного приймача, слід враховувати, що температурна сходинка формується не безпосередньо на його фланці, який відповідає вхідному хвилеводу К-діапазону, а на циліндричному хвилеводі, який на півметра виступає над цим фланцем. Тому в якості нижнього рівня температурної сходинки слід обирати не температуру рідкого азоту (77.4 К), а додавати до цієї температури ще деяку додаткову температуру, яка реєструється системою за умов наявності теплового розв’язування. Ми оцінюємо значення цього додаткового внеску приблизно в 10 К.

В якості узгоджених навантажень використовувалось два однотипні навантажувача, виготовлені з епоксидної смоли, наповненої карбонільним залізом. Вони були зроблені у формі конусів з гладкою зовнішньою поверхнею без додаткових ребер жорсткості. Розміри навантажувачів узгоджувались із розмірами хвилеводів С та К діапазонів. Всередину кожного навантажувача вмонтовано електронні датчики температури. По зов-

нішньому периметру верхньої частини кожного навантажувача був розташований пінопластовий міні-басейн для додаткового охолодження навантажувачів рідким азотом безпосередньо під час вимірів. Перед початком “холодних” вимірів навантажувач повністю охолоджувався рідким азотом в зовнішньому басейні протягом 5 ÷ 7 хв, а вже потім переміщувався у відповідний хвилевід, де додатково охолоджувалась лише зовнішня (верхня) частина навантажувача. Попри всі зусилля, вжиті для підтримки умов локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР) при охолодженні навантажувачів, нам, вірогідно, не вдалося втримати під час вимірювань умови ЛТР в зовнішніх шарах навантажувачів, бо вони були безпосередньо розташовані всередині хвилеводів С та К діапазонів. Тому ми розглядаємо оцінки власної температури шумів, наведені нижче, як максимально можливі.

Оскільки криогенні приймачі в обох діапазонах мали коефіцієнти підсилення близько 30 дБ, вони ефективно відсікали внесок наступних каскадів приймального тракту до температури власних шумів усієї системи прийому та реєстрації (без урахування внеску антени з променеводом, розташованих попереду криогенних приймачів). Отже відгуки на радіовипромінювання “холодного” та “теплого” навантаження, аналогічні тим, що наведені на рис. 10, ми знімали з відповідних виходів комутатора каналів С та К діапазонів (див. рис. 1). Потім, після додаткового згладжування ковзним вікном, ці спектрограми аналізувались за алгоритмом “У”-методу оцінки власної температури шумів. Кінцева формула, за якою обчислювалась температура власних шумів $T_{SN}^{C,K}(f)$ в С або К діапазонах (верхні індекси С, К) в обраному перетині радіотелескопа РТ-32, має такий вигляд:

$$T_{SN}^{C,K}(f) = \frac{T_1(f) - T_2(f)r^{C,K}(f)}{r^{C,K}(f) - 1}, \quad (3)$$

де $T_1(f) = 292$ К, $T_2(f) = 88$ К, $r^{C,K}(f)$ – лінійне співвідношення спектральних щільностей потужності за умов ЛТР для температури T_1 та аналогічних умов для температури T_2 . Звідси і нижче в формулах ми враховуємо залежності від частоти, оскільки для “холодного” навантажувача товщина скін-шару залежить від частоти. Хоч для “теп-

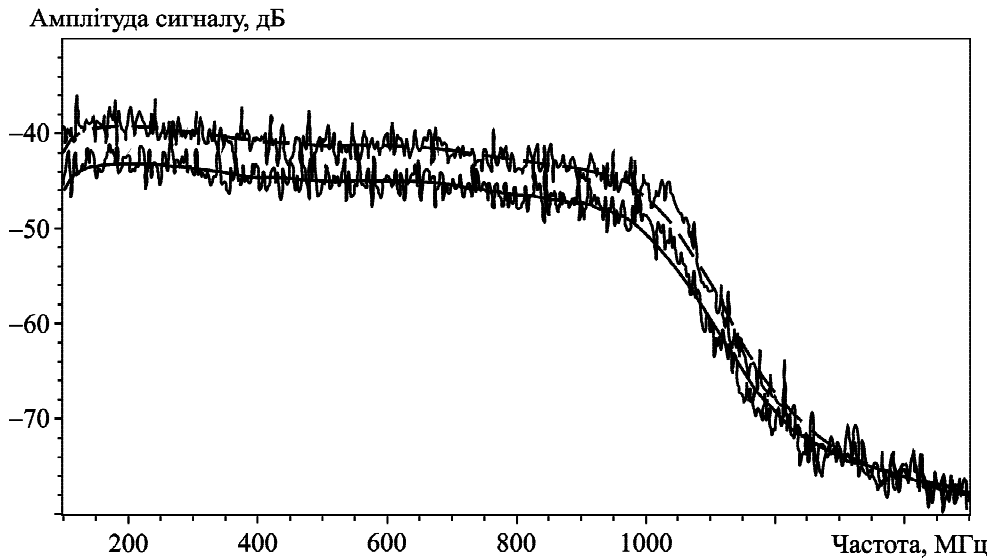


Рис. 10. Температурна сходинка, що отримана за умов ЛТР для $T_1 = 292$ К (штрихова лінія), та за умов ЛТР для $T_2 \approx 88$ К (суцільна лінія). Виміряні оригінальні АЧХ представлені осцилюючими кривими. Усереднені оцінки спектральних щільностей відгуків були отримані після згладжування вимірних АЧХ (штрихова та суцільна лінії) системи прийому та реєстрації в К-діапазоні. На цьому рисунку по вісі абсцис показана відеочастота на виході спектроаналізатора, в яку трансформується смуга частот “в небі”, що належить відповідному діапазону. В даному випадку частоті 1000 МГц на вісі абсцис відповідає частота “в небі” 22200 МГц

лого” навантажувача такої залежності не очікується, $T_1 = 292$ К, у формулах, наведених нижче, зручніше використовувати змінну $T_1(f) = 292$ К, аналогічну змінній $T_2(f)$.

Перерахунок згладжених АЧХ в К-діапазоні за формулою (3) дає максимальні оцінки значень температури власних шумів. Вони наведені на рис. 11. Ці оцінки отримані в перетині циліндричного хвилеводу, розташованого на півметра вище фланця криогенного приймача К-діапазону.

Зазначимо, що в криогенному блоці приймача К-діапазону ще до першого підсилювача розташований розподільвач ортогональних кругових поляризацій цього діапазону. Цей розподільвач може додавати внесок в температуру власних шумів криогенного приймача у відповідній смузі частот. На це вказує також загальний тренд збільшення еквівалентної температури власних шумів з частотою, який спостерігається на рис. 11.

Алгоритм, наведений вище, використовувався також для оцінок власних шумів у С-діапазоні. Відмінність використання цього алгоритму полягала в тому, що перетин, у якому забезпечувався температурний стрибок, був вибраний на фланці, розташованому на переході від нижнього зрізу гофрованого конусного випромінювача до розпо-

ділювача ортогональних лінійних поляризацій в С-діапазоні. Наразі цей розподільвач є доволі громіздкою конструкцією, яку неможливо охолоджувати. Тому він знаходиться при кімнатній температурі. Ця температура в момент вимірювань становила $T_1 = 292$ К.

Поверхня навантажувача в С-діапазоні є суттєво більшою за поверхню навантажувача в К-діапазоні, але й об’єм цього навантажувача є більшим ніж в К-діапазоні. Тому ми оцінили еквівалентну температуру “холодного” навантажувача в С-діапазоні у ті ж $85 \div 90$ К. За цими припущеннями еквівалентна температура власних шумів на вході розподільвача ортогональних лінійних поляризацій в С-діапазоні становить (20 ± 10) К.

Оцінки еквівалентної температури власних шумів, виконані в С-діапазоні, мають досить значну нерівномірність у смузі робочих частот. Це може пояснюватись відхиленнями значень коефіцієнтів стоячої хвилі у вимірюваннях в “холодному” та “теплому” режимах. Інше пояснення полягає в використанні послідовного спектроаналізатора, оскільки аналогічні оцінки слід виконувати з використанням паралельного спектроаналізатора з можливостями накопичення.

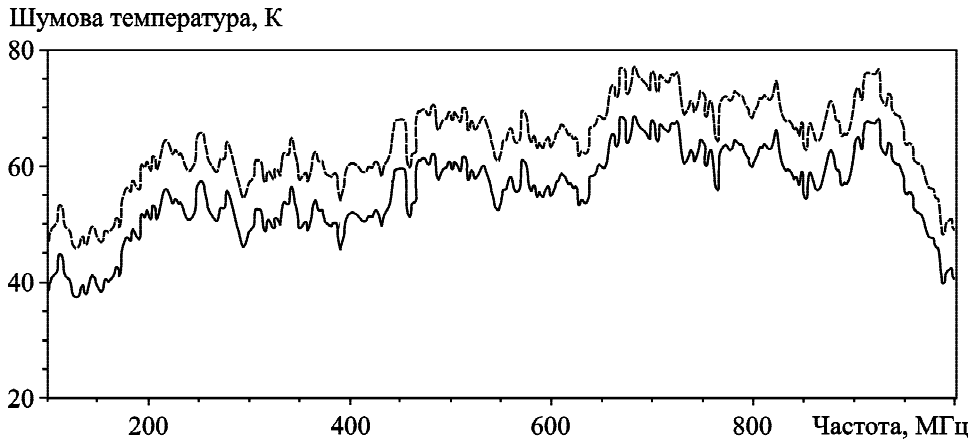


Рис. 11. Оцінки температури власних шумів для криогенного приймача К-діапазону (візуальна нерівномірність частотної характеристики приймача спричинена використанням послідовного спектроаналізатора без можливості усереднення)

Про всяк випадок ми зробили ще одну оцінку еквівалентної температури власних шумів, використавши для неї еквівалентну шумову температуру неба в С-діапазоні. Отже, за нашими оцінками, які відповідають оцінкам, виконаним в [20], температура неба разом з атмосферним доданком (розсіяння теплових радіо-фотонів в атмосфері) на частоті 5 ГГц складає $5 \div 6$ К. Додаток до загальної температури на вході системи від реєстрації тепла Землі через бічні пелюстки діаграми спрямованості антени не перевищує $5 \div 6$ К. Втрати в променеводі, які ми оцінювали на рівні від -0.2 дБ до -0.3 дБ, додають ще $13 \div 18$ К. Тому загальна температура шумів у обраному нами перетині може складати від $T_{SKY} = 23$ К до $T_{SKY} = 30$ К. Виходячи з цих припущень ми отримуємо, що температура власних шумів усієї системи прийому РТ-32 в С-діапазоні, складає від 32 до 59 К.

Головна складність, яка поки що не дозволяє нам точніше визначити власну температуру шумів криогенного приймача або всієї системи прийому та реєстрації РТ-32, полягає у відсутності можливості забезпечити сталі умови ЛТР в усьому об'ємі навантажувачів, включаючи скін-шар поверхні, яка саме і забезпечує баланс випромінювання та поглинання у відповідному хвилеводі С- або К-діапазону.

З іншого боку, ми можемо зробити додаткові порівняння відгуків криогенного приймача у разі використання на вході всієї системи прийому РТ-32 шумів неба, перераховуючи їх до обраного перетину радіотракту, та у разі використання від-

гуку від “теплого” навантажувача в цьому ж перетині. Оскільки попередньо було визначено, що температура власних шумів криогенного приймача на фланцях розподільвача лінійних ортогональних поляризацій С-діапазону складає $T_{SN}^C \approx (20 \pm 10)$ К, то в робочій смузі частот має бути справедливим наступне лінійне співвідношення відгуків між “теплим” (нижній індекс 1) або “холодним” (індекс 2) навантажувачем та шумами неба в С-діапазоні:

$$r_{1,2}^C(f) = \frac{T_{1,2}(f) + T_{SN}^C}{T_{SKY}^C(f) + T_{SN}^C}, \quad (4)$$

де $T_{1,2}(f)$ – температура “теплого” або “холодного” навантажувача; $T_{SKY}^C(f)$ – температура шумів неба в С-діапазоні, яка приведена в обраний перетин системи прийому; T_{SN}^C – температура власних шумів системи прийому в цьому ж перетині.

Оскільки умови ЛТР найбільш сталі для “теплого” навантажувача, у формулі (4) ми можемо вважати невідомим $T_{SKY}^C(f)$. Тоді

$$T_{SKY}^C(f) = \frac{T_1 + T_{SN}^C (1 - r_1^C(f))}{r_1^C(f)}. \quad (5)$$

Звідси можна оцінити $T_{SKY}^C(f) \approx (35 \pm 10)$ К.

Тепер, вважаючи що нам відомий параметр $T_{SKY}^C(f)$, знайдемо з (4), скориставшись формулою (5), параметр $T_2(f)$, який вважатимемо невідомим:

$$T_2(f) = T_{SKY}^C(f)r_2^C(f) - T_{SN}^C(1 - r_2^C(f)). \quad (6)$$

Модель розподілу власних шумів у різних перетинах радіотелескопу РТ-32, наведена вище, є самоузгодженою. Для її побудови ми використали перевизначену систему рівнянь. Суттєво уточнити цю модель дозволить проведення вимірювань температури власних шумів усієї приймальної системи з використанням поглинач, який перекриє усю поверхню верхнього зрізу труби променеводу РТ-32.

При оціночних втратах в променеводі на рівні $-0.2 \div -0.3$ дБ внесок до еквівалентної температури шумів неба та всіх інших втрат, які мають місце в С-діапазоні до обраного перетину системи прийому РТ-32, є дещо вищим за власну температуру шумів системи прийому та реєстрації радіотелескопа в цьому ж перетині. Приймаючи це до уваги, слід зазначити, що еквівалентна температура власних шумів криогенних підсилювачів у С-діапазоні є узгодженою з системою прийому РТ-32.

Розрахунки за формулою (6) показують, що еквівалентна шумова температура скін-шару “холодного” навантажувача в С-діапазоні при заданих параметрах втрат в променеводі та внеску шумів від неба, а також при урахуванні внеску теплових шумів Землі та зроблених оцінках T_{SN}^C може становити (90 ± 10) К. Тобто ця температура, як ми і зазначали вище, суттєво відрізняється від температури рідкого азоту.

Зроблені припущення підтверджуються вимірюваннями на радіометрі ПрАТ “НВП Сатурн”, який працював паралельно зі спектроаналізатором. Вимірювання на радіометрі продемонстрували, що температура скін-шару навантаження залишається більш-менш стабільною лише на протязі $3 \div 4$ с. За цей час якісні виміри навіть в одному каналі реєстрації виконати складно. Додатково зазначимо, що температура в центрі навантаження, яку фіксує вмонтований в об’єм навантажувача датчик температури, дорівнює ≈ 80 К після охолодження і залишається стабільною доволі довгий інтервал часу ($\approx 1 \div 2$ хв). Тож на наступному етапі аналогічних вимірювань планується використовувати поглинач великого розміру, яким слід перекривати вхідний фланець труби променеводу біля рефлектора.

4. Висновки

Надаються результати робіт зі створення на основі антени MARK-4B радіотелескопа РТ-32 та результати вимірювання власних шумів його радіоприймальної системи в С та К діапазонах. Описано також схемні рішення та результати вимірювань фазових шумів гетеродинів радіоприймальної системи. Показано, що для забезпечення необхідної спектральної роздільної здатності та малих фазових шумів слід застосовувати СПЦС за умов низького значення коефіцієнта множення частоти, а також за умов ретельної фільтрації сигналів усіх опорних джерел. Результати цього дослідження можуть бути застосовані як для радіоастрономічних спостережень, так і для проектування мікрохвильових синтезаторів.

Отримані оцінки власних шумів криогенних підсилювачів показали, що в С-діапазоні основний внесок у температуру власних шумів системи прийому РТ-32 дають втрати (затухання) сигналу в променеводі разом з внеском температури реліктового фону, внеском розсіяння теплових радіофотонів Землі в атмосфері та внеском просочування теплових шумів Землі через бічні пелюстки діаграми спрямованості антени. В К-діапазоні основний внесок в шумову температуру системи прийому становлять зовнішні шуми від неба, що виникають при розсіянні теплових радіофотонів Землі на водяних парах атмосфери.

В обох діапазонах власні шуми криогенних підсилювачів виявились узгодженими з зовнішніми шумами системи прийому РТ-32. Для точнішої оцінки власних шумів радіотелескопів, оснащених променеводами, слід використовувати зовнішні поглиначі, здатні перекривати увесь отвір променеводу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ульянов О. М., Резниченко А. М., Захаренко В. В., Антюфеев А. В., Королев А. М., Патока А. Н., Присяжний В. И., Поихало А. В., Войтюк В. В., Мамарев В. Н., Ожинский В. В., Власенко В. П., Чмиль В. М., Лебедь, В. И., Паламар М. И., Чайковский А. В., Пастернак Ю. В., Стрембицкий М. А., Натаров М. П., Стещенко С. А., Гламаздин В. В., Шубный А. И., Кириленко А. А., Кулик Д. Ю., Коноваленко А. А., Литвиненко Л. Н., Яцкив Я. С. Создание радиотелескопа РТ-32 на базе антенной системы MARK-4B. 1. Проект модернизации и первые результаты. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2019. Т. 24, № 2. С. 87–116. DOI: 10.15407/rpra24.02.087

2. Антюфеев А. В., Королев А. М., Пагока А. Н., Шульга В. М., Ульянов О. М., Резниченко А. М., Захаренко В. В., Присяжный В. И., Поихало А. В., Войтюк В. В., Мамарев В. Н., Ожинский В. В., Власенко В. П., Чмиль В. М., Лебедь В. И., Паламар М. И., Чайковський А. В., Пастернак Ю. В., Стрембицкий М. А., Нагаров М. П., Стешенко С. А., Гламаздин В. В., Шубний А. И., Кириленко А. А., Кулик Д. Ю., Пилипенко А. М. Создание радиотелескопа РТ-32 на базе антенной системы MARK-4В. 2. Оценка возможности проведения спектральных наблюдений радиоастрономических объектов. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2019. Т. 24, № 3. С. 163–183. DOI: 10.15407/rpra24.03.163
3. Woodburn L., Natusch T., Weston S., Thomasson P., Godwin M., Granet C., and Gulyaev S. Conversion of a New Zealand 30-metre telecommunications antenna into a radio telescope. *Publ. Astron. Soc. Aust.* 2015. Vol. 32. id. e017. DOI: 10.1017/pasa.2015.13.
4. Yonekura Y., Saito Y., Sugiyama K., Soon K. L., Momose M., Yokosawa M., Ogawa H., Kimura K., Abe Y., Nishimura A., Hasegawa Y., Fujisawa K., Ohyama T., Kono Y., Miyamoto Y., Sawada-Satoh S., Kobayashi H., Kawaguchi N., Honma M., Shibata K. M., Sato K., Ueno Y., Jike T., Tamura Y., Hirota T., Miyazaki A., Niinuma K., Sorai K., Takaba H., Hachisuka K., Kondo T., Sekido M., Murata Y., Nakai N., and Omodaka T. The Hitachi and Takahagi 32 m radio telescopes: Upgrade of the antennas from satellite communication to radio astronomy. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* 2016. Vol. 68, Is. 5. id. 74 DOI: 10.1093/pasj/psw045
5. Belloche A., Meshcheryakov A. A., Garrod R.T., Pyushin V. V., Alekseev E. A., Motiyenko R. A., Margulès L., Müller H. S. P., and Menten K. M. Rotational spectroscopy, tentative interstellar detection, and chemical modeling of N-methylformamid. *Astron. Astrophys.* 2017. Vol. 601. id. A49. DOI: 10.1051/0004-6361/201629724
6. Peng H., Wu Z., Zhang B., Chen Y., Zheng X., Jiang D., Shen X., Chen X., and Sotnikova Yu. V. Radio properties of the OH megamaser galaxy IRAS 02524+2046. *Astron. Astrophys.* 2020. Vol. 638. id. A78. DOI: 10.1051/0004-6361/202037559
7. Gentile K. and Cushing R. *A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis, 1999*. Analog Devices Inc. 1999. URL: <https://www.analog.com/en/education/education-library/technical-tutorial-dds.html>
8. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovskyy V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., and Griebmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. Vol. 5, Is. 4. id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
9. LMX2595 20-GHz Wideband PLLATINUM™ RF Synthesizer With Phase Synchronization and JESD204B Support. Data Sheet. *Texas Instruments Inc.* URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/lmx2595> (viewed: 30.07.2020).
10. SMT GaAs MMIC x2 Active frequency multiplier, 13–24.6 GHz output. HMC814LC3B Data Sheet. *Analog Devices Inc.* URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc814.pdf> (viewed: 30.07.2020).
11. Low Power 250 MSPS 10-Bit DAC 1.8 V CMOS Direct Digital Synthesizer. AD9913 Data Sheet. *Analog Devices Inc.* URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9913.pdf> (viewed: 30.07.2020).
12. 3.5 GSPS Direct Digital Synthesizer with 12-Bit DAC. AD9914 Data Sheet. *Analog Devices Inc.* URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9914.pdf> (viewed: 30.07.2020).
13. Cushing R. Single-Sideband Upconversion of Quadrature DDS Signals to the 800-to-2500-MHz Band. *Analog Dialogue*. 2000. Vol. 34, No. 3. URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-34/number-1/articles/single-sideband-upconversion-of-quadrature-dds-signals.pdf>
14. Алексеев Е. А., Захаренко В. В. Синтезатор прямого цифрового синтеза в микроволновой спектроскопии. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2007. Т. 12, № 2. С. 205–213.
15. Алексеев Е. А., Мотиенко Р. А., Маргулес Л. Спектрометры миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на основе синтезаторов прямого цифрового синтеза. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2011. Т. 16, № 3. С. 313–327.
16. Алексеев Е. А., Илюшин В. В., Мещеряков А. А. Высокоточный радиопетрометр с субдуплеровским спектральным разрешением. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2014. Т. 19, № 4. С. 364–374.
17. DC-to-2.5 GHz High IP3 Active Mixer. AD8343 Data Sheet. *Analog Devices Inc.* URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8343.pdf> (viewed: 30.07.2020).
18. Wideband Synthesizer with Integrated VCO. ADF4351 Data Sheet. *Analog Devices Inc.* URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4351.pdf> (viewed: 30.07.2020).
19. MicroConverter® Multichannel 24-/16-Bit ADCs with Embedded 62 kB Flash and Single-Cycle MCU. ADuC845/ADuC847/ADuC848 Data Sheet. *Analog Devices Inc.* URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADUC845_847_848.pdf (viewed: 30.07.2020).
20. Bleiders M., Bezrukovs V., and Orbidans A. Performance Evaluation of Irbene RT-16 Radio Telescope Receiving System. *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* 2017. Vol. 54, Is. 6. P. 42–53. DOI: 0.1515/lpts-2017-0040

REFERENCES

1. ULYANOV, O. M., REZNICHENKO, O. M., ZAKHARENKO, V. V., ANTYUFYEV, A. V., KOROLEV, A. M., PATOKA, O. M., PRISIAZHNI, V. I.,

- POICHALO, A. V., VOITYUK, V. V., MAMAREV, V. N., OZHINSKII, V. V., VLASENKO, V. P., CHMIL, V. M., LEBED, V. I., PALAMAR, M. I., CHAIKOVSKII, A. V., PASTERNAK, YU. V., STREMBITSKII, M. A., NATAROV, M. P., STESHENKO, S. O., GLAMAZDYN, V. V., SHUBNY, A. S., KIRILENKO, A. A., KULIK, D. Y., KONOVALENKO, A. A., LYTVYNENKO, L. M. and YATSKIV, Y. S., 2019. Creating the RT-32 Radio Telescope on the Basic of MARK-4B Antenna System. 1. Modernization Project and First Results. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 24, no. 2, pp. 87–116. DOI: 10.15407/rpra24.02.087
2. ANTYUFYEV, A. V., KOROLEV, A. M., PATOKA, O. M., SHULGA, V. M., ULYANOV, O. M., REZNICHENKO, O. M., ZAKHARENKO, V. V., PRISIAZHNI, V. I., POICHALO, A. V., VOITYUK, V. V., MAMAREV, V. N., OZHINSKII, V. V., VLASENKO, V. P., CHMIL, V. M., LEBED, V. I., PALAMAR, M. I., CHAIKOVSKII, A. V., PASTERNAK, YU. V., STREMBITSKII, M. A., NATAROV, M. P., STESHENKO, S. O., GLAMAZDYN, V. V., SHUBNY, A. S., KIRILENKO, A. A., KULIK, D. Y. and PYLYPENKO, A. M., 2019. Creating the RT-32 Radio Telescope on the Basic of MARK-4B Antenna System. 1. Estimation of the Possibility for Making Spectral Observations of Radio Astronomical Objects. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 24, no. 3, pp. 163–183. DOI: 10.15407/rpra24.03.163
 3. WOODBURN, L., NATUSCH, T., WESTON, S., THOMASSON, P., GODWIN, M., GRANET, C. and GULYAEV, S., 2015. Conversion of a New Zealand 30-metre telecommunications antenna into a radio telescope. *Publ. Astron. Soc. Aust.* vol. 32, id. e017. DOI: 10.1017/pasa.2015.13
 4. YONEKURA, Y., SAITO, Y., SUGIYAMA, K., SOON, K. L., MOMOSE, M., YOKOSAWA, M., OGAWA, H., KIMURA, K., ABE, Y., NISHIMURA, A., HASEGAWA, Y., FUJISAWA, K., OHYAMA, T., KONO, Y., MIYAMOTO, Y., SAWADA-SATOH, S., KOBAYASHI, H., KAWAGUCHI, N., HONMA, M., SHIBATA, K. M., SATO, K., UENO, Y., JIKE, T., TAMURA, Y., HIROTA, T., MIYAZAKI, A., NIINUMA, K., SORAI, K., TAKABA, H., HACHISUKA, K., KONDO, T., SEKIDO, M., MURATA, Y., NAKAI, N. and OMODAKA, T., 2016. The Hitachi and Takahagi 32 m radio telescopes: Upgrade of the antennas from satellite communication to radio astronomy. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* vol. 68, is. 5, id. 74. DOI: 10.1093/pasj/psw045
 5. BELLOCHE, A., MESHCHERYAKOV, A. A., GARROD, R. T., ILYUSHIN, V. V., ALEKSEEV, E. A., MOTIYENKO, R. A., MARGULÈS, L., MÜLLER, H. S. P. and MENTEN, K. M., 2017. Rotational spectroscopy, tentative interstellar detection, and chemical modeling of N-methylformamid. *Astron. Astrophys.* vol. 601, id. A49. DOI: 10.1051/0004-6361/201629724
 6. PENG, H., WU, Z., ZHANG, B., CHEN, Y., ZHENG, X., JIANG, D., SHEN, Z., CHEN, X. and SOTNIKOVA, YU. V., 2020. Radio properties of the OH megamaser galaxy IRAS 02524+2046. *Astron. Astrophys.* vol. 638, id. A78. DOI: 10.1051/0004-6361/202037559
 7. GENTILE, K. and CUSHING, R., 1999. *A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis, 1999* [online]. Analog Devices Inc. [viewed 25 July 2020]. Available from: <https://www.analog.com/en/education/education-library/technical-tutorial-dds.html>
 8. ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPKIN, S., KOLIADIN, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., DOROVSKYY, V., SHEPELEV, V., BUBNOV, I., YERIN, S., MELNIK, V., KOVAL, A., SHEVCHUK, N., VASYLIEVA, I., MYLOSTNA, K., SHEVTSOVA, A., SKORYK, A., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., PLAKHOV, M., VASILENKO, N., VASYLKIVSKYI, Y., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., RYABOV, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHYN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A. and GRIEBMEIER, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* vol. 5, is. 4, id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
 9. TEXAS INSTRUMENTS INC., 2019. *LMX2595 20-GHz Wideband PLLATINUM™ RF Synthesizer With Phase Synchronization and JESD204B Support. Data Sheet* [online]. [viewed 30 July 2020]. Available from: <https://www.ti.com/lit/gpn/lmx2595>
 10. ANALOG DEVICES INC., 2020. *HMC814LC3B, SMT GaAs MMIC x2 Active frequency multiplier, 13 - 24.6 GHz output. HMC814LC3B Data Sheet* [online]. [viewed 30 July 2020]. Available from: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc814.pdf>
 11. ANALOG DEVICES INC., 2019. *Low Power 250 MSPS 10-Bit DAC 1.8 V CMOS Direct Digital Synthesizer. AD9913 Data Sheet* [online]. [viewed 30 July 2020]. Available from: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9913.pdf>
 12. ANALOG DEVICES INC., 2016. *3.5 GSPS Direct Digital Synthesizer with 12-Bit DAC. AD9914 Data Sheet* [online]. [viewed 30 July 2020]. Available from: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9914.pdf>
 13. CUSHING, R., 2000. Single-Sideband Upconversion of Quadrature DDS Signals to the 800-to-2500-MHz Band. *Analog Dialogue* [online]. vol. 34, no. 3 [viewed 25 July 2020]. Available from: URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-34/number-1/articles/single-sideband-upconversion-of-quadrature-dds-signals.pdf>
 14. ALEKSEEV, E. A. and ZAKHARENKO, V. V., 2007. Direct Digital Synthesizer at the Microwave Spectroscopy. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 12, no. 2, pp. 205–213. (in Russian).
 15. ALEKSEEV, E. A., MOTIYENKO, R. A. and MARGULÈS, L., 2011. Millimeter- and Submillimeter-Wave Spectrometers on the Basis of Direct Digital Synthesizers. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 16, no. 3, pp. 313–327. (in Russian).
 16. ALEKSEEV, E. A., ILYUSHIN, V. V. and MESHCHERYAKOV, A. A., 2014. High-Precision Microwave Spectrometer with Sub-Doppler Spectral Resolution. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 19, no. 4, pp. 364–374. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra19.04.364

17. ANALOG DEVICES INC., 2006. *DC-to-2.5 GHz High IP3 Active Mixer. AD8343 Data Sheet* [online]. [viewed 30 July 2020]. Available from: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8343.pdf>
18. ANALOG DEVICES INC., 2017. *Wideband Synthesizer with Integrated VCO. ADF4351 Data Sheet* [online]. [viewed 30 July 2020]. Available from: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4351.pdf>
19. ANALOG DEVICES INC., 2016. *MicroConverter® Multichannel 24-/16-Bit ADCs with Embedded 62 kB Flash and Single-Cycle MCU. ADuC845/ADuC847/ADuC848 Data Sheet* [online]. [viewed 30 July 2020]. Available from: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADUC845_847_848.pdf
20. BLEIDERS, M., BEZRUKOV, V. and ORBIDANS, A., 2017. Performance Evaluation of Irbene RT-16 Radio Telescope Receiving System. *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* vol. 54, is. 6, pp. 42–53. DOI: 0.1515/lpts-2017-0040

O. M. Ulyanov¹, V. V. Zakharenko^{1,2}, E. A. Alekseev^{1,2}, O. M. Reznichenko¹, I. O. Kulahin¹, V. V. Budnikov¹, V. I. Prisiazhnii³, A. V. Poikhalo³, V. V. Voytyuk³, V. N. Mamarev³, V. V. Ozhinskyi⁴, V. P. Vlasenko⁴, V. M. Chmil⁵, I. K. Sunduchkov⁵, M. M. Berdar⁵, V. I. Lebed⁵, M. I. Palamar⁶, A. V. Chaikovskii⁶, Yu. V. Pasternak⁶, M. A. Strembitskii⁶, M. P. Natarov⁷, S. O. Steshenko⁷, V. V. Glamazdin⁷, O. I. Shubnyi⁷, A. O. Kyrylenko⁷, and D. Yu. Kulyk⁷

¹Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

²V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

³National Space Facilities Control and Test Center,
State Space Agency of Ukraine,
8, Moskovska St., Kyiv, 01010, Ukraine

⁴Space Research and Communication Center,
Tract “Pid azymutom”, Sasiv Village Council,
Zolochiv district, Lviv region, 80713, Ukraine

⁵Private Joint Stock Company
“Scientific and Production Enterprise “Saturn”,
2B, Les Kurbas Ave., Kyiv, 03148, Ukraine

⁶Ternopil Ivan Puluj National Technical University,
56, Ruska St., Ternopil, 46001, Ukraine

⁷O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
12, Akad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

THE RT-32 RADIO TELESCOPE CONSTRUCTION BASED ON THE MARK-4B ANTENNA SYSTEM.

3. LOCAL OSCILLATORS AND SELF-NOISE OF THE RECEIVING SYSTEM

Purpose: High resolution investigation of spectral lines of space sources requires low intrinsic noise of the radio telescope receiving system. It is provided with both input cryogenic amplifiers and low phase noise of local oscillators. To make spectral studies, it is necessary to be able to tune the frequencies of local oscillators with a small frequency step. The paper presents the results of developing the frequency synthesizers, which simultaneously provide both a very high frequency resolution and a low level of phase noise. The results of measurements of natural noise of the RT-32 radio telescope radio receiving systems are given also.

Design/methodology/approach: The RT-32 receiving systems are constructed as heterodyne receivers with two stages of frequency conversion. Tuning of receiving systems with a frequency step of 10 or 20 MHz is provided by local oscillators of the first frequency conversion stage, and precise tuning is provided due to the ultra-high resolution (0.0001 MHz) of DDS-based (direct digital synthesizer) local oscillators of the second frequency conversion stage.

Findings: It is shown that the application of direct digital synthesizers is possible only with the low values of frequency multiplication factors, as well as under the conditions of careful filtering of all reference signals. The parameters of the local oscillators were measured with the N9951A spectrum analyzer (Keysight Technologies) with the high resolution and wide dynamic range. To measure the radio telescope receiving system noise characteristics, a special matched loads with the possibility of cooling down to the liquid nitrogen temperature were made. The noise temperature measurements were made in different cross sections of the RT-32 receiving system. Comparison of such measurements in different configurations makes it possible to provide a preliminary estimation of the RT-32 self noise in the C- and K-bands.

Conclusions: The results of measurements of self noise of radio receiving systems and phase noise of local oscillators of the RT-32 radio telescope show that within the C-band the radio telescope is capable to perform high-sensitive studies in both a wide frequency band and a narrow frequency band with the high spectral resolution. Within the K-band, the natural noise is comparable ($\approx 60 \div 80$ K) with the external noise that also allows studying the radiation of maser radio sources.

Key words: antenna, self noise, local oscillator, receiving system, radio telescope, RT-32, spectral lines

Стаття надійшла до редакції 15.07.2020